

Пловдивски университет "Паисий Хилендарски" Факултет по математика и информатика Катедра Приложна математика и моделиране



Снежана Георгиева Гочева-Илиева

Аналитични, статистически и интелигентни методи за моделиране

Автореферат

за присъждане на научната степен "Доктор на науките" в област на висше образование 4. Природни науки, математика и информатика Професионално направление 4.5. Математика (Математическо моделиране и приложение на математиката)

Пловдив

2016

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита на разширен катедрен съвет на катедра "Приложна математика и моделиране" при Факултет по математика и информатика на Пловдивския университет "Паисий Хилендарски", град Пловдив, проведен на 09.03.2016 г.

Дисертационният труд е с общ обем от 300 страници и включва седем глави, заключение и библиография, състояща се от 318 източника. Списъкът на авторските публикации включва 19 заглавия, невключени в библиографията. Дисертацията съдържа 137 фигури и 72 таблици.

Номерацията на формулите, цитиранията, примерите, таблиците и фигурите съвпада с тяхната номерация в дисертационния труд.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 21 юни 2016 г. от 14 ч. в Заседателната зала на Нова сграда на Пловдивския университет "Паисий Хилендарски", Пловдив, бул. "България" №236, етаж 2, на открито заседание на научното жури.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на ФМИ, Нова сграда на ПУ, всеки ден от 8:30 до 17:00 часа.

Научно жури

Председател: доц. д-р Дойчин Тодоров Бояджиев, ПУ "Паисий Хилендарски"

Членове:

Проф. д.м.н. Иван Томов Димов, ИИКТ на БАН (рецензент)

Проф. д.ф.н. Катя Желева Вутова, ИЕ на БАН (рецензент)

Проф. д.ф.н. Ренна Бориславова Дюлгерова, ИФТТ на БАН (рецензент)

Проф. д.м.н. Леда Димитрова Минкова, СУ "Климент Охридски"

Проф. д-р Велизар Тодоров Павлов, РУ "Ангел Кънчев"

Доц. д.м.н. Иванка Миткова Желева, РУ "Ангел Кънчев"

Автор на дисертационния труд: Снежана Георгиева Гочева-Илиева

Заглавие: Аналитични, статистически и интелигентни методи за моделиране

Съдържание

АКТУАЛНО	ОСТ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА	5
ЦЕЛ И ЗАД	АЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	7
ОБЗОР НА	ОСНОВНИТЕ РЕЗУЛТАТИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	8
Глава 1.	Въвеление	8
Глава 2.	АНАЛИТИЧНИ МОДЕЛИ НА ГАЗОВАТА ТЕМПЕРАТУРА НА ЛАЗЕРИ С МЕТАЛНИ ПАРИ	8
2.1.	Обект на изследване	8
2.2.	Аналитическо моделиране на радиалния температурен профил на лазер с пари на меден	
	бромид [D4]	8
2.3.	Аналитични модели и симулации на радиалния температурен профил на лазер с пари на	
2.4	стронциев бромид [D8]	0
2.4. И	Самосъгласуван аналитичен модел на радиалния температурен профил на SrBr2 лазер 1	0
ИЗВС Глара 3	Ана питицио нислено молениране на уараутеристичи на рисоконестотен разрян	4
і ЛАВА З. 3 1	АПАЛИТИЧНО-ЧИСЛЕНО МОДЕЛИГАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВИСОКОЧЕСТОТЕН РАЗРИД Числено определяне на нитензитета на електрициото поле еле енсоконестотен хелиее	5
5.1.	палено определяне на интензитета на електричното поле 888 високочестотен хелиев пазпяд [D]]	5
3.2.	разряе [] 1] Моделиране на радиочестотен аргонов разряд [D3]	5
3.3.	Моделиране стабилността на високочестотен хелиев разряд [D2]	5
3.4.	Аналитични критерии на пробива на аргон при ниско налягане в комбинирани електрични	
	полета [D17]	5
Изво	рди към Глава 3	8
Глава 4.	ПРИЛОЖЕНИЕ НА МНОГОМЕРЕН СТАТИСТИЧЕСКИ АНАЛИЗ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА	
ЛМ	АЩ1	.9
4.1.	Приложение на метода на регресия с главните компоненти за лазер с пари на меден бромид [D5]	9
4.2.	Класификация на основните параметри на УВ лазер с йерархичен клъстерен анализ [D6] 1	9
4.3.	Многомерен анализ за изследване на времето на живот на УВ лазер [D13]	9
Изво	оди към Глава 4	2
Глава 5.	ПРИЛОЖЕНИЕ НА ИНТЕЛИГЕНТНИ МЕТОДИ ЗА ИЗВЛИЧАНЕ НА ЗНАНИЯ ОТ ДАННИ ЗА МОДЕЛИРАНЕ	
HA	ЗАВИСИМОСТИ И КЛАСИФИКАЦИИ ЗА ЛАЗЕРИ С МЕТАЛНИ ПАРИ	23
5.1.	Приложение на многомерните адаптивни регресионни сплайни за моделиране на изходната	• •
5.2	Modern Ha y B nasep [D/]	:3
5.2.	мооелиране на изхооните характеристики на у в ионен лазер с МАРС метоо с разширена извадка [D9]2	24
5.3.	Моделиране на изходната мощност на лазер с пари на меден бромид с метода МАРС [D10]	24
5.4.	Моделиране и симулации на изходната мощност на лазер с пари на стронциев бромид с метода MAPC [D11]2	24
5.5.	Приложение на метода на класификационните и регресионни дървета за моделиране на	
	изходната мощност на лазер с пари на меден бромид [D12]	?9
Изво	рди към Глава 5	<u>'9</u>
I ЛАВА 6.	ПРИЛОЖЕНИЕ НА СТОХАСТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЧИСТОТАТА НА ВЪЗДУХА	1
0.1.	Приложение на факторен анализ и еономерен стохастичен SARIMA метоо за изслеоване	51
62	концентрациите на замърсители на възоуха на грао Благоевграо [D15]	1
0.2.	приложение на метооа заклма с трансферни функции за изслеоване концентрациите на фици прахови настини за град Шумен в зависимост от метеорологишите променлиен	
	фини прилови чистици за грио тумен в зависимост от метеорологичните променливи [D14]	21
63	[D14] Изследване зависимостта на нивата на ФПЧ10 и серен диоксид от метеорологичните	1
0.5.	актори със SARIMA/TF метод за данни за град Кърджали [D19]	35
Изво	рди към Глава 6	35
Глава 7.	ПРИЛОЖЕНИЕ НА GPS РЕГУЛЯРИЗИРАЩА РЕГРЕСИЯ С ИНТЕЛИГЕНТНИ ПРЕДСКАЗВАЩИ ТЕХНИКИ З	A
MC	ОДЕЛИРАНЕ НА ЗАВИСИМОСТИ	6
7.1.	Моделиране на изходната лазерна генерация на лазер с пари на меден бромид с помощта на	
	обобщена регуляризираща регресия GPS и предсказващи техники [D16]	6

	Повишаване на предсказващата способност на GPS моделите чрез трансформация на	
	зависимата променлива Pout на лазер с пари на меден бромид	36
7.3	Моделиране на концентрацията на ФПЧ10 за град Шумен с GPS регресия и предсказващи	ı
	техники [D14]	36
7.4	Приложение на метода на главните компоненти и GPS за изследване на чистотата на	
	въздуха и моделиране на нивото на въглероден оксид за град Лимитровград [D18]	36
Изе	оди към Глава 7	44
ЗАКЛЮЧЕ	НИЕ	. 46
Научни	И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ. ЗАШИТАВАНИ ОТ АВТОРА	. 46
Списък	НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	. 47
Апроба	ІИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ	50
A)	Токлади. изнесени на научни форуми и семинари	50
	, Тубликации, разработени и финансирани по проекти	51
Б)		
Б) Д Деклар	-у	. 52
Б) Д Деклар Бла	лция за оригиналност годарности	. 52 52

Актуалност на изследванията

Прилагането на математически модели в науката и технологиите предоставя важни инструменти за изучаване, експериментиране, симулиране и насочване на експеримента, за откриване на съществени черти и свойства на явления и процеси, за проверка на теории в практиката, за създаване на нови изделия и др. С помощта на математическото моделиране значително се съкращава цената и времето за проектиране и се пести висококвалифициран човешки труд.

В настоящия дисертационен труд се използват различни методи на математическото моделиране – аналитични, аналитично-числени, статистически и най-съвременни интелигентни методи с машинно обучение в две области – лазерната физика и науките за околната среда.

Всички получени модели имат за цел решаване на реален проблем и се базират на реални устройства и данни.

Задачите са многомерни и зависят от голям брой параметри. Една част от параметрите са т. нар. контролни параметри, които определят класа на решавания проблем, чрез задаване на конкретни ограничения, напр. количество и вид входни величини, максимален брой използвани функции, дълбочина на дървото, тип кросвалидация, очакван процент на съвпадение с измерените данни, вид грешки, точност на резултата, и др. За намиране и избор на удовлетворителни решения на задачите възниква необходимост и от прилагане на множество различни методи. Наличието на голям брой възможни решения, получени от различни приложени методи и зададени контролни параметри, предоставят по-големи възможности и различни алтернативи при практическото им прилагане и оценката на реалните резултати.

Основните проблеми, третирани в дисертационния труд са:

• Проблемът с газовата температура на лазери с метални пари

В този труд се изследват три типа перспективни лазери с метални пари:

- лазер с пари на меден бромид (CuBr лазер),
- ултравиолетов йонен лазер с пари на меден бромид (UV лазер),
- лазер с пари на стронциев бромид (SrBr2 лазер).

Разглежданите лазери са развити и патентовани от екипа на Лаборатория по лазери с метални пари, към Институт по физика на твърдото тяло "Академик Георги Наджаков" на Българската Академия на Науките, София [215, 216, 267, 268, 270, 272, 273]. По-нататъшното развитие на лазерите с метални пари (ЛМП) изисква повишаване на техните изходни характеристики - лазерна мощност, ефективност и време на живот, при стабилен температурен режим, което ще позволи разширяване на областите на приложението им.

В съществуващите досега модели за определяне на температурата на газа на лазери с метални пари се използва опростен модел, описан от Кушнер през 1983 г. в [157], в който газовата температура по направление на радиуса на тръбата се намира с явно решение на уравнението на топлопроводност с постоянна дясна част и гранични условия от първи и втори род. Това изисква задаване на температурата на вътрешната стена на лазерната тръба. Поради високата температура и голямата честота на импулсите, на практика няма надеждни методи за експериментално измерване на температурата в тръбата. Формулата на Кушнер се прилага в литературата като измерената температура на вътрешната стена на тръбата се пренася като температура на вътрешната стена. В други работи тази температура се коригира с подходящи множители. Този подход не отчита всички топлинни процеси в температурния профил на лазерната тръба, наличието на тръбата с околната среда и други процеси. Освен това, при проектиране на нови лазери, граничната температура остава неизвестна и решението на Кушнер не може да се използва [196]. Тези проблеми са актуални, особено в случая на новия

високомощен лазер с пари на стронциев бромид, който има по-сложен дизайн на лазерната тръба.

• Някои проблеми в моделирането на високочестотен разряд

Високочестотните капацитивни разряди имат широко приложение в редица технологични процеси [163, 207]. В областта на моделирането на високочестотния разряд при ниски налягания, вкл. изследваните лазери, стоят редица нерешени проблеми, свързани с определяне на потенциала и интензитета на електричното поле, произтичащото разпределение на газовата температура на разряда и др. [207]. Друг проблем е незадоволителното познаване и контролиране на условията на устойчивостта на разряда за осигуряване на стабилна работа на устройствата.

• Проблеми в статистическата обработка на експериментални данни за ЛМП

Въпреки наличието на сравнително голям обем експериментални данни за ЛМП, тяхната обработка не е била предмет на специални изследвания. Проблемите и трудностите на моделирането на ЛМП с класическите методи на многомерен статистически анализ произтичат от някои особености на данните. В това число - голяма размерност на задачите - от 6 до 12 входни лазерни величини, описващи функционирането на лазера. Тези входни величини включват: диаметър на тръбата, дължина на активната зона, входна електрическа мощност, честота на лазерните импулси, температура на резервоарите и др.; данните са получени без планиране на статистически експеримент; липсват достатъчно данни за средните по мощност лазери; в много от експериментите са документирани само най-добрите резултати, при което някои стойности на входните величини са оптимизирани.

При изредените особености на данните построяването и получаването на качествени статистически валидни модели с прилагането на класически многомерни методи като цяло е предизвикателство и изисква прилагане на специфични подходи, вкл. интелигентни методи.

• Актуалност и отворени проблеми на моделирането на ЛМП с непараметрични интелигентни методи

Като отворени актуални задачи в моделирането на ЛМП с интелигентни методи с машинно обучение могат да се дефинират следните, които не могат да се решат с класически статистически анализ: не се отчита влиянието на всички изследвани лазерни характеристики; не са изследвани локалните линейни и нелинейни зависимости между входните лазерни характеристики и зависимите изходни характеристики (изходна лазерна мощност, ефективност, време на живот) за откриване на подобласти в многомерното пространство на променливите, които са най-съществени в общата картина на взаимодействия; качеството на предсказване на моделите не е достатъчно добро и съизмеримо с точността на експеримента.

• Актуалност на моделирането на замърсяването на атмосферния въздух в населени места в България

Един от най-важните и актуални проблеми на съвременния свят е опазването на околната среда. Важна част в цялостната застрашена среда на Земята е нейната атмосфера, и в частност чистотата на въздуха в населените места. В България се констатират редица систематични превишения на замърсяванията на атмосферния въздух. Най-сериозни са замърсяванията с фини прахови частици (ФПЧ10, РМ10). Сред най-проблемните градове са: Перник (най-замърсен за Европа през 2011 г.), Пловдив, София, Благоевград и др. Значителни превишавания или трайни фонови нива от серен диоксид (SO2) и азотни окиси (NO2, NO, NOx) се наблюдават в Димитровград, Стара Загора и др.

По същество стоят редица нерешени задачи от моделиране и анализиране на данни за състоянието на чистотата на въздуха в България. Сред тях е задачата за изследване на зависимости на временни редове за въздушни замърсители, метеорологични и др. условия с помощта на стохастични и интелигентни методи за моделиране на реални данни, с цел прогнозиране и превенция на замърсяването на въздуха.

Цел и задачи на дисертационния труд

От направения в дисертацията литературен обзор и анализ на състоянието на проблемите е заключено, че в научен и научно-приложен аспект стоят редица актуални задачи в разглежданите две приложни области - лазерите с метални пари (ЛМП) и чистотата на атмосферния въздух. На базата на това може да се заключи, че темата на дисертационния труд е актуална.

Основна цел на дисертационния труд

Прилагане на аналитични, статистически и интелигентни методи за построяване и изследване на модели при решаване на актуални задачи от областта на лазерите с метални пари и замърсяването на атмосферния въздух в населени места.

Основни задачи на дисертационния труд

- 1) Развитие и създаване на нови класове аналитични модели за определяне на газовата температура в ЛМП (лазер с пари на меден бромид и лазер с пари на стронциев бромид);
- 2) Аналитично-числено моделиране на електричното поле и температурния профил във високочестотен хелиев и аргонов разряд и провеждане на симулации;
- Създаване на нови теоретични критерии за аналитично-числено моделиране на стабилността на високочестотни разряди;
- 4) Прилагане на многомерен анализ за статистическо моделиране на зависимости и класификация на променливите в лазери с метални пари;
- 5) Статистическо изследване на времето на живот на УВ лазер;
- 6) Моделиране на нелинейни и локални зависимости в ЛМП с непараметричния метод МАРС и приложение на моделите за предсказване и планиране на експеримента;
- 7) Приложение на метода на класификационните и регресионни дървета CART за моделиране на изходната мощност на ЛМП;
- 8) Стохастично моделиране на зависимости на едномерни временни редове на замърсители на атмосферния въздух и краткосрочни прогнози;
- 9) Стохастично моделиране с трансферни функции на зависимости на замърсители на атмосферния въздух с метеорологични променливи и краткосрочни прогнози;
- Приложение и изследване на интелигентни предсказващи техники за моделиране на изходната мощност на лазер с пари на меден бромид и предсказване на екстремален експеримент;
- 11) Приложение на интелигентни предсказващи техники за моделиране на замърсявания на атмосферния въздух в зависимост от метеорологичните променливи и прогнозиране.

Обзор на основните резултати на дисертационния труд

Глава 1. Въведение

Направен е литературен обзор, анализ на нерешени и отворени проблеми в областите на изследване. Формулирани са целта и задачите на този труд.

Тази глава няма приносен характер.

Глава 2. Аналитични модели на газовата температура на лазери с метални пари

В тази глава са развити, анализирани и приложени аналитични модели на газовата температура в напречното сечение на активния обем на два типа лазери с метални пари (ЛМП). В частност е построен аналитичен самосъгласуван модел на температурния профил на лазер с пари на стронциев бромид, независещ от измервания. Моделите са базирани на решения на уравнението на топлопроводност с подходящи нови нелинейни гранични условия от трети и четвърти род, отчитащи процесите на топлопредаване през многослойната лазерна стена, конструктивните материали, температура на околната среда и други условия.

2.1. Обект на изследване

Лазерите с метални пари (ЛМП) са вид газоразрядни високоимпулсни лазери с широко приложение в практиката и научните изследвания [318, 214, 276, 295].

С математически методи се изследва проблемът с температурния профил на два типа лазери с пари на металите: лазер с пари на меден бромид (CuBr) и лазер с пари на стронциев бромид (He-SrBr2).

2.2. Аналитическо моделиране на радиалния температурен профил на лазер с пари на меден бромид [D4]

Полученият клас аналитични модели се базира на следната основна задача.

Газовата температура T_g в напречното сечение на разряда, намиращ се във вътрешността на лазерната тръба, при стационарен режим на работа, удовлетворява квазистационарното уравнение на топлопроводност [309] по направление на радиуса:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\lambda_g\frac{dT_g}{dr}\right) + q_v = 0, \quad 0 \le r \le R_1.$$
(2.2)

където λ_g е коефициент на топлопроводност на газа, q_v е обемна плътност на вътрешния източник на топлина, която в общия случай може да е функция на радиуса *r*. Тук λ_g има вида $\lambda_g = \lambda_0 T_g^m$, $Wm^{-1}K^{-1}$, а константите λ_0 , *m* зависят от типа на газа [298].

Уравнение (2.2) се разглежда с гранични условия от първи и втори род от вида:

$$T_g(R_1) = T_1, \qquad \frac{dT_g}{dr}\Big|_{r=0} = 0.$$
 (2.3)-(2.4)

където T₁ е температурата на най-вътрешната стена на лазерната тръба, R₁ е радиусът.

При средна обемна плътност на мощността $q_v = \text{const} = q_0 = Q/vol$, където Q е мощността, vol е обемът на активната зона, решението на задача (2.2) - (2.4) има вида [157]:

$$T_{g}(r) = \left[T_{1}^{m+1} + \frac{q_{v}(m+1)}{4\lambda_{0}}\left(R_{1}^{2} - r^{2}\right)\right]^{1/(m+1)}, \ 0 \le r \le R_{1},$$
(2.5)

Опростеното решение (2.5) (формула на Кушнер) се използва широко в газовите лазери и лазерите с метални пари от 1983 г. Неизвестната стойност на T_1 се заменя със стойността на измерената температура на най-външната стена T_w , т.е. полага се приближено $T_1 \approx T_w$ или T_1 се намира с фотометрични методи, които са с неудовлетворителна точност.

В построените от нас модели тази стойност се определя коректно, чрез извеждане на различни допълнителни нелинейни гранични условия, като се описва реалният температурен обмен, с отчитане на елементи като конструкция на тръбите, неравномерно разпределение на q_v , температура на околната среда, типа на охлаждане на тръбата и др.

В този параграф се разглежда случая на лазер с пари на меден бромид (Фиг. 2.4). Предполага се, че $q_v = const$ и не се изисква познаване на температурата на външната повърхност на тръбата. Поставят се нови смесени гранични условия от трети и четвърти род, които за цилиндрична конфигурация се извеждат при спазване на принципите на топлотехниката [309, 188]:

$$T_1 = T_2 + \frac{q_l \ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda_1}, \quad T_2 = T_3 + \frac{q_l \ln(d_3/d_3)}{2\pi\lambda_2}$$
(2.6)

$$Q = \alpha F_3 (T_3 - T_{air}) + F_3 \varepsilon c \left[(T_3/100)^4 - (T_{air}/100)^4 \right].$$
(2.7)

Граничните условия (2.6) изразяват уравнението за непрекъснатост на топлинния поток на границата на две среди. Тук q_l е мощността на единица дължина, $q_l = Q/l_a$, l_a е активната дължина на лазера; λ_1, λ_2 са коефициентите на топлопроводност на кварцовата



Фиг. 2.4. Напречен разрез на лазерната тръба на CuBr лазер:

1-разряд, 2- кварцова тръба, 3- топлинна изолация, *d*₁ = 56*mm*, *d*₂ = 60*mm*, *d*₃ = 70*mm* тръба и топлинната изолация, d_i , j = 1, 2, 3са диаметрите на съставящите елементи на тръбата. Гранично условие (2.7) описва начина на топлообмен между външната повърхнина на лазерната тръба и околната среда. Първото събираемо произлиза от закона на Нютон-Рихман за топлообмен чрез конвекция, а второто – от закона на Стефан-Болцман за топлообмен чрез излъчване. Величината Q е общият топлинен поток, равен на общата консумирана електрическа мощност, коефициент α e на топлопредаване, F₃ е външната активна повърхнина на тръбата, ε е интегрален излъчвателен коефициент, зависещ материала (тук кварц), $c = 5.67Wm^{-2}K^{-4}$ излъчвателен коефициент, $T_{air} = 300K$ температура на околния въздух. В гранично условие (2.7) фигурират две неизвестни величини: коефициентът на топлопредаване α и температурата T_3 .

При естествена конвекция е получен моделът, в който граничното условие (2.7) е:

$$q_{l} = 0.46\pi\lambda_{air} \left[\frac{g\beta_{air}d_{3}^{3}(T_{3} - T_{air})}{\nu_{air}^{2}} \right]^{0.23} (T_{3} - T_{air}) + \pi d_{3}\varepsilon c \left[\left(\frac{T_{3}}{100} \right)^{4} - \left(\frac{T_{air}}{100} \right)^{4} \right].$$
(2.12)

Моделът е приложен за изчисляване на температурния профил на реален лазер и за провеждане на числени симулации в случая на естествена конвекция на охлаждане на лазерната тръба.

2.3. Аналитични модели и симулации на радиалния температурен профил на лазер с пари на стронциев бромид [D8]

Обект на изследване е високомощен лазер с пари на стронциев бромид. Направен е преглед на построените до момента авторски модели за този тип лазер и са представени нови числени резултати по тях. Разгледани са три възможни качествени типове на разпределение на обемната плътност на мощността $q_v(r)$. Моделите имат сложен вид, като отчитат всички процеси на топлообмен и многослойната стена на лазерната стена. Зададена е постоянна температура на външната стена под изолацията $T_4 = const$. За реален стронциев лазер е изчислен радиалният температурен профил с добро съвпадение с експеримента. Направени са различни симулации за новоразработван лазер при задаване на постоянна стойност на q_v . Прототипът на авторския софтуер LasSim е използван за провеждане на симулации с математическите модели.

2.4. Самосъгласуван аналитичен модел на радиалния температурен профил на SrBr2 лазер

Моделът се построява при следните предположения:

- (i) температурният профил се определя при квазистационарен режим на работа;
- (ii) температурата на газа между лазерните импулси се променя незначително;



Фиг. 2.7. Напречно сечение на газоразрядната тръба на SrBr2 лазер: 1-керамична тръба (втулка от Al₂O₃), 2пространство между тръбите, запълнено с хелий; 3- външна кварцова тръба; 4 топлоизолация от ZrO₂ вата; $\lambda_g, \lambda_1, \lambda_{2,He}, \lambda_3, \lambda_4$ - коефициенти на топлопроводност на средите, $d_j, j = 1,...,5$ - диаметри: $d_1 = 19.8mm, d_2 = 25.5mm, d_3 = 40mm,$ $d_4 = 46mm, d_5 = 67.5mm.$

- (iii) цялата постъпваща входна електрическа мощност се преобразува в топлина в активния лазерен обем, а мощността, предаваща се на стените на тръбата в резултат на емисията на разряда и дезактивацията на възбудените и заредени частици не се отчита;
- (iv) средната обемна плътност на мощността q_v е функция на радиуса на тръбата;
- (v) не се изискват измервания на температури на лазера.

Моделът се описва с уравнението на топлопроводност (2.2) с условия (2.3)-(2.4) в разряда и следните гранични условия за радиалния пренос на топлина през тръбите:

Условие А1) Гранично условие за температурата T_1 на вътрешната керамична стена:

$$T_1 = T_2 + \frac{q_l \ln(d_2/d_1)}{2\pi \lambda_l}, \qquad (2.28)$$

Условие Б1) Гранично условие за пространството с хелий между двете тръби:

$$Q = S_2 c \varepsilon_{eff} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right] + \frac{2\pi \lambda_2 l_a}{\ln \left(\frac{d_3}{d_2} \right)} (T_2 - T_3)$$
(2.29)

където $\lambda_2 = \lambda_{2,He} = \lambda_0 \left(0.5 (T_2 + T_3) \right)^m$ е коефициент на топлопроводност на хелия между

тръбите, $\varepsilon_{e\!f\!f} = \left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{S_2}{S_3} + \frac{1}{F_{23}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}\right)^{\!-1}$.

Условие В1) Гранично условие за кварцовата тръба с отчитане на пропускането на част от излъчването:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_3 l_a (T_3 - T_4)}{\ln\left(d_4 / d_3\right)} + k(T_2, T_3) S_2 c \varepsilon_{eff} \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_3}{100}\right)^4 \right] = Q_4 + k(T_2, T_3) Q_1.$$
(2.30)

Тук $k(T_2, T_3)$ е коефициент на пропускане на топлината през кварцовата тръба, Q_4 е част от топлинната енергия, която преминава през кварцовата тръба за сметка на процеса на топлопроводност.

Условие Г1) За изолацията от ZrO₂ вата въвеждаме гранично условие:

$$T_4 = T_5 + \frac{q_l \ln(d_5/d_4)}{2\pi\lambda_4},$$
(2.31)

където $\lambda_4 = 0.15 \ Wm^{-1}K^{-1}$ [109, 110] е коефициентът на топлопроводност на изолацията.

Условие Д1) Въвеждаме ново гранично условие за границата на топлоизолацията с околното пространство във вида:

$$Q = \alpha S_5 \left(T_5 - T_{air} \right) + S_5 \varepsilon_2 c \left[\left(\frac{T_5}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{air}}{100} \right)^4 \right] = Q_5 + Q_6.$$
(2.32)

В това уравнение S_5 е външна повърхнина на топлоизолацията, α - коефициент на топлопредаване.

Температурата T_5 на външната повърхност на изолацията остава неизвестна и може да бъде изчислена от моделните уравнения при известен коефициент на топлопредаване α .

Предложеният самосъгласуван аналитичен модел на радиалния топлинен профил на лазер с пари на стронциев бромид е общ. Като конфигурация, той може да е прилага и за други типове ЛМП и устройства с подобни конструктивни елементи. Моделът се описва с уравнението на топлопроводност (2.2) по радиуса на тръбата и включва топлинните процеси от нейния център до околната среда, чрез граничните условия (2.3), (2.4) и новите условия от трети и четвърти род А1), Б1), Б1), Г1) и Д1).

• Приложение на самосъгласувания температурен модел за стронциев лазер

Определянето на температурния профил се извършва в обратен ред на зададените нови гранични условия, а именно: (2.32), (2.31), (2.30), (2.29), (2.28). В разряда се използва точната формула (2.19) с променливо $q_v(r)$.

• Определяне на температурата на изолацията Т5

За целта трябва да се реши уравнение (2.32), където е неизвестен и коефициентът на топлопредаване α . В случай на естествена и принудена конвекция α е определен от нас за някои други видове лазери [119, 120, 123]. Тук аналогично α е получен във вида:

$$\alpha = \frac{0.46\lambda_{air}}{d_5} \left[g\beta_{air} d_5^3 \frac{T_5 - T_{air}}{v_{air}^2} \right]^{0.25}.$$
(2.34)

За гранично условие (2.32), изразено с мощност на единица дължина $q_l = Q/l_a$, имаме:

$$q_{l} = 0.46\pi\lambda_{\rm air} \left[g\beta_{\rm air} d_{5}^{3} \frac{T_{5} - T_{air}}{\nu_{\rm air}^{2}} \right]^{0.25} (T_{5} - T_{air}) + \pi d_{5}\varepsilon c \left[\left(\frac{T_{5}}{100}\right)^{4} - \left(\frac{T_{air}}{100}\right)^{4} \right].$$
(2.35)

В нелинейното уравнение (2.35) единствена неизвестна величина е температурата на изолацията T_5 . За конкретния лазер с Wolfram Mathematica получаваме $T_5 = 618.1K$.

• Определяне на температурата Т4 на външната стена на кварцовата тръба

От (2.37) намираме $T_4 = 1184.9K$. Тази стойност е много близка (в рамките на 1%) до задаваната в модела за сравнение по предния параграф стойност $T_4 = 1200K$.

• Определяне на температурите Т₃ и Т₂

При известен коефициент на пропускане на кварцовата тръба $k(T_2,T_3)$ е необходимо решаване на системата от уравнение (2.35) и (2.36). Коефициентът на пропускане на кварцовата тръба задаваме в следния вид:

$$k(T_2, T_3) = \left[\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} k(\lambda) r(\lambda, T_2) d\lambda - \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} k(\lambda) r(\lambda, T_3) d\lambda\right] / \left\{ c \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_3}{100}\right)^4 \right] \right\}.$$
 (2.36)

Тук $k(\lambda)$ е спектрален коефициент на пропускане на кварца, $r(\lambda,T)$ е функция на Планк за относителната спектрална плътност на излъчването на абсолютно черното тяло. Пропускането на кварца е в граници от $\lambda_a = 160nm$ до $\lambda_b = 4\mu m$ [110]. В този диапазон спектралният коефициент на пропускане на кварца е сравнително постоянен и има стойност $k(\lambda) = 0.9$ в безмерни единици [110].

При известни T_2, T_3 интегралите в уравнение (2.36) могат да бъдат решени числено. За целта прилагаме метода на последователните итерации. Изчисленията се извършват в следната последователност:

Задаваме първоначална (нулева) итерация $T_2^{(0)}$, $T_3^{(0)}$ на двете неизвестни температури, като спазваме условието $T_2^{(0)} > T_3^{(0)}$. С помощта на уравнение (2.36) изчисляваме началната (нулева) итерация на коефициента на пропускане $k^{(0)}$. С тази негова стойност, решавайки съвместно системата (2.29) и (2.30), намираме първата итерация на двете температури: $T_2^{(1)}$ и $T_3^{(1)}$. Заместваме тези две стойности в (2.36) и изчисляваме първата итерация за коефициента на пропускане $k^{(1)}$. По-нататък отново решаваме системата (2.29), (2.30) и определяме втората итерация на двете температури: $T_2^{(2)}$ и $T_3^{(2)}$, и т.н. По този начин получаваме 2 редици от числа: $T_2^{(0)}$, $T_2^{(1)}$, $T_2^{(2)}$,..., $T_3^{(0)}$, $T_3^{(0)}$, $T_3^{(0)}$, $T_3^{(1)}$, $T_3^{(2)}$,..., $T_3^{(n)}$,... Ако итерационният процес за T_2 и T_3 е сходящ, той може да бъде спрян при предварително зададена относителна грешка, например $\delta T_2 < 1\%$ и $\delta T_3 < 1\%$. Конкретните компютърни изчисления показват, че процесът е бързо сходящ и зададената относителна грешка се постига с 4-6 итерации.

По този начин за примера на изходния модел за сравнение получаваме $T_3 = 1195.1 K$, $T_2 = 1290.2 K$ и k = 0.589.

• Определяне на температурата Т₁.

За целта се използва формула (2.28). Конкретната получена стойност е $T_1 = 1321.1$ К.

• Определяне на температурния профил в разряда

След намирането на всички гранични температури температурата в разряда (в керамичната тръба) се изчислява по формула (2.19). Получената крива за данните на изходния модел за сравнение е показана на Фиг. 2.14.



Фиг. 2.14. Разпределение на температурата в напречното сечение на разряда в активния лазерен обем на високомощен SrBr2 лазер, получено от самосъгласувания модел.

Цялостното разпределение на температурата (профилът) в напречното сечение на активния лазерен обем е илюстрирано на Фиг. 2.15.



Фиг. 2.15. Цялостен температурен профил по радиуса на тръбата на SrBr2 лазер, получен от самосъгласувания модел.

• Анализ на резултатите от самосъгласувания температурен модел

Новото гранично условие (2.32) позволява да се извършва температурен анализ на нови лазерни източници, за които температурата T_4 на външната стена на лазерната тръба под изолацията не може да бъде измерена. Развитият нов модел по-точно отразява сложната физическа природа на движението на топлинната енергия от центъра на тръбата и нейното взаимодействие с околното пространство. За данните на реалния високомощен SrBr2 лазер,

в кварцовата тръба се пресмята, че основен е процесът на топлопроводност, който е равен на 65%, а 35% се падат на лъчепропускането. В пространството между двете тръби основен е процесът на излъчване от 60%, а останалите 40% се дължат на процеса топлопроводност. На повърхността на изолацията двата процеса - на излъчване и естествена конвекция имат еднакъв дял от по 50%.

Изводи към Глава 2

В първия параграф 2.1 са описани обектите на изследване в дисертацията – три типа лазери с метални пари (ЛМП): лазер с пари на меден бромид, излъчващ във видимата зона, ултравиолетов йонен лазер с пари на меден бромид и лазер с пари на стронциев бромид. Дадени са основните им технически и експлоатационни характеристики, и техни приложения.

В следващите параграфи са развити нови аналитични модели и са решени основни проблеми за оценка на газовата температура на разгледаните типове лазери, съгласно формулираните задачи на дисертационния труд.

2.1. За пръв път е построен нов температурен модел за лазер с пари на меден бромид. Моделът се описва с квазистационарно уравнение на топлопроводност в напречното сечение на лазерната тръба и нелинейни гранични условия от трети и четвърти род по радиуса на тръбата. Обемната плътност на мощността q_v е постоянна, задава се температурата на външната стена на тръбата под изолацията. Моделът е приложен за пресмятане на температурния профил в случай на естествена конвекция. Установено е, че основен механизъм при естествената конвекция е топлинното излъчване. Развитият модел позволява да се извършва оценка на температурата на газа чрез компютърни симулации - промяна на геометричния дизайн, материала на лазерната тръба и топлинната тръба с околната среда.

2.2. Направен е преглед на по-рано развити авторски модели на радиалния температурен профил на високомощен He-SrBr2 лазер, които се описват със стационарното уравнение на топлопроводност и смесен тип нелинейни гранични условия при произволно зададен вид на обемната плътност на мощността q_v . Проведени са симулации за сравнение на различните модели.

2.3. Развит е аналитичен самосъгласуван модел за изчисляване и оценка на температурния профил на високомощен SrBr2 лазер, излъчващ в инфрачервената област. Моделът е обобщение на предишните модели на автора на стронцевия лазер, чрез формулиране на нови допълнителни гранични условия, описващи всички процеси на предаване на топлина от центъра на разряда към околната среда. Моделът е самосъгласуван в смисъл, че не зависи от конкретни измервания на лазера. Моделът е приложен за определяне на разпределението на температурата в напречното сечение на съществуващ SrBr2 лазер. Получените резултати са много добре съгласувани с експеримента, като относителната грешка на пресметнатото и измереното значение на температурата под изолацията е 1.25%. Направено е сравнение с получените температури от по-рано развития модел в параграфи 2.2-2.3. Установено е добро съвпадение между числените резултати.

2.4. Изчисленията и симулациите с математическите модели са проведени с авторски кодове на Фортран, имплементирани в прототипа на авторския софтуер LasSim и кодове на Wolfram Mathematica.

2.5. Всички развити аналитични модели могат да се използват при компютърни симулации и пресмятания на температурния профил с цел както за развитие на съществуващи, така и на бъдещи устройства. Могат да се прилагат и като елемент в по-общи кинетични и други типове модели за ЛМП и друг тип подобни газови лазери. Сред моделите

самосъгласуваният модел има най-големи преимущества, тъй като не зависи от измервания за конкретното лазерно устройство.

Глава 3. Аналитично-числено моделиране на характеристики на високочестотен разряд

В тази глава са изложени някои модели за изчисляване на различни характеристики на високочестотни (ВЧ) разряди като електрично поле, връзката на електричното поле с газовата температура, пробив на разряда.

3.1. Числено определяне на интензитета на електричното поле във високочестотен хелиев разряд [D1]

Приложен е метод за определяне на разпределенията на потенциала и интензитета на електричното поле в напречен високочестотен хелиев разряд чрез числено решаване на двумерното квазистационарно уравнение на Поасон. Установено е добро съвпадение на получените резултати с прости аналитични едномерни модели и с други резултати за хелиев разряд, работещ при сходни условия. Проведени са симулации.

3.2. Моделиране на радиочестотен аргонов разряд [D3]

Представени са два теоретико-експериментални (хибридни) модела за описание на системата "електрично поле – температурен профил" на високочестотен силнотоков аргонов разряд. Компютърните симулации дават възможност за определяне на допустимите граници за промяна на плътността на тока и електричното поле при постоянна електрическа мощност. Установено бе възможно нарастване на максималната газова температура на аргона до 100°С при 10-15% нарастване на електрическата мощност в безразмерни единици. Този резултат показва параметрите, гарантиращи надеждността на електрическото захранване и възможни схемни решения на захранващото устройство.

3.3. Моделиране стабилността на високочестотен хелиев разряд [D2]

С помощта на двумерен числен модел са пресметнати потенциалът и интензитетът на полето във високочестотен хелиев разряд. Изследван е преходът от слаботоков към силнотоков разряд в напречното сечение на лазерната тръба. Установено е възможно възникване на предварителен пробив на разряда по линия, несъвпадаща с минималното разстояние между електродите. Методът се прилага за конкретни симулации при различни условия, влияещи на процеса на пробив. Постигнато е много добро съвпадение на получените резултати със съществуващи експериментални данни и прости едномерни модели.

3.4. Аналитични критерии на пробива на аргон при ниско налягане в комбинирани електрични полета [D17]

За оптимизиране на плазмените технологични процеси е необходимо изучаването на условията на пробива на разряда в газоразрядното устройство, измерването и апроксимирането на кривите на пробива в постояннотокови, (ПТ), високочестотни (BЧ, RF) и комбинирани електрически полета. Кривата на пробива най-често има вида $U_{br} = F(pd)$.

Прилагането на този вид разряд зависи съществено от познаване условията за възникване на нестабилност на разряда, които могат да причинят отклонения от необходимия режим на работа на газоразрядното устройство. Класическите резултати в изследване на пробива, включително аналитичното му моделиране произхождат от произведенията на Кихара [143], Таунсенд [253], Пашен [193] и др. Въпреки това, теоретичните модели за механизма на пробива все още не са на задоволително ниво. Забелязано е, че прилагането на слабо постоянно напрежение към ВЧР предизвиква осезателно повишаване на пробивното напрежение във ВЧ разряд в дясната част на кривата на пробив [166]. Минимумът на кривата на пробив се премества в посока към по-високи напрежения и налягания.

Цел на параграф 3.4 е с помощта на известни експериментални данни да се получи нов аналитичен критерий, описващ кривата на пробива в аргонов разряд при ниско налягане в комбинирани електрични полета, чрез определянето на пробивното напрежение $U_{rf} = F(pd)$. Изведеният критерий е подобрена модификация на известния критерий в [203] и се явява развитие на получения за аргон в *RF* полета критерий от [122].

За пробива във ВЧ разряд основна роля има йонизацията на молекулите от електроните и дифузията на електроните към стените на разрядната камера. Критерият за пробив е:

$$\frac{\nu_i}{D_e} = \frac{1}{\Lambda^2},\tag{3.12}$$

където υ_i е честотата на йонизация на молекулите от електроните, D_e е коефициентът на дифузия на електроните, Λ е дифузионната дължина, зависеща от геометрията на газоразрядната камера [206, 203].

При извода на критерий (3.12) се приема, че коефициентът на дифузия на електроните е изотропна функция, т.е. не зависи от направлението на движение на електроните.

При налагане на слабо ПТ електрично поле критерий (3.12) придобива вида [203]:

$$\frac{\upsilon_i}{D_e} = \frac{1}{\Lambda^2} - \left(\frac{E_{dc}}{2D_e\mu_e}\right)^2,\tag{3.13}$$

където μ_e е коефициент на подвижност на електроните, E_{dc} е интензитет на ПТ поле. В този случай критерий (3.12) може да се представи във вида [203]:

$$\left(A_{1}pd - \frac{A_{1}\lambda U_{rf}}{\sqrt{2}B_{0}C_{2}d}\right)\exp\left(-\frac{B_{0}pd}{\sqrt{2}U_{rf}}\right) = \left\{1 + \left[\frac{U_{dc}}{U_{rf}}\left(A_{1}pd - \frac{A_{1}\lambda U_{rf}}{\sqrt{2}B_{0}C_{2}d}\right)\left(\frac{c_{i}\rho}{2\sigma}\right)^{1/2}\right]^{2}\right\}^{1/2}, \quad (3.14)$$

Където $A_1, B_0, C_2, c_i, \lambda, \sigma, \rho$ са молекулярни константи, U_{dc} и U_{rf} са респективно напреженията на ПТ и ВЧ разряди.

До този момент при разглеждането на този проблем не е бил отчитан фактът, че във ВЧР съществува собствено постояннотоково (ПТ) поле. Неговата стойност приблизително може да се определи с емпиричната зависимост $U_{dc} = U_{rf} / \pi$ [207].

Следователно, за критерий (3.13) не е необходимо да има приложено външно електрично поле. Използвайки известните зависимости $v_i \approx \alpha v_d \approx \alpha \mu_e E$, (3.13) представяме във вида

$$\frac{\alpha E}{D_e / \mu_e} = \frac{1}{\Lambda_e^2} + \left(\frac{E_{dc}}{2D_e / \mu_e}\right)^2.$$
(3.16)

В по-горните формули α е коефициент на обемна йонизация на газа, v_d дрейфова скорост на електроните. Най-често коефициентът на обемна йонизация се апроксимира във вида, $\alpha / p = A \exp(-B/(E/p))$, където A, B са константи. По експериментални данни съотношението D_e / μ_e апроксимираме чрез $D_e / \mu_e \approx M + NE / p$ с подходящо определени константи M, N. Дифузионната дължина Λ за плоски конфигурации се задава с израза $\Lambda^{-2} = (\pi / d)^2$. По този начин критерий (3.13) се преобразува във вида:

$$U_{rf} \, pdA \exp\left(-Bpd \,/\, U_{rf}\right) \left(M + N \frac{U_{rf}}{pd}\right)^{-1} - U_{rf}^2 \left[2\pi \left(M + N \frac{U_{rf}}{pd}\right)\right]^{-2} - \pi^2 = 0.$$
(3.17)

Критерий (3.17) е използван от нас в [122] за оценка на кривата на пробив в аргонов разряд.

• Построяване на модела

При наличие на външно електрично поле критерий (3.13) трябва да бъде модифициран. Величината E_{dc} се заменя с $E_{dc,\Sigma}$, която е резултантна от взаимодействието на двете полета – външно $E_{dc,ex}$ и вътрешно $E_{dc,in}$. По-точно, в сила е равенството: $E_{dc,\Sigma}^2 = E_{dc,in}^2 + E_{dc,ex}^2 + 2E_{dc,in}E_{dc,ex}\cos\beta$, където β е ъгълът между двете полета. По този начин критерий (3.17) се привежда в следния вид:

$$U_{rf} p dA \exp\left(-Bp d / U_{rf}\right) / \left(M + N \frac{U_{rf}}{p d}\right) - \left(U_{rf}^{2} + \pi^{2} U_{dc}^{2} + 2\pi U_{rf} U_{dc} \cos\beta\right) \left[2\pi \left(M + N \frac{U_{rf}}{p d}\right)\right]^{-2} - \pi^{2} = 0$$
(3.19)

Тук $U_{dc,in} \approx E_{dc,in}d$, $U_{dc,ex} \approx E_{dc,ex}d$ са значенията на приложеното вътрешното (собствено) и на външно напрежение, съответно.

Ще разгледаме два гранични случая: (а) $\beta = 180^{0}$: Получаваме две полета с противоположни посоки. Критерий (3.19) придобива вида (3.20), където във второто събираемо се взима знак минус (3.20):

$$U_{rf} p dA \exp\left(-\frac{Bpd}{U_{rf}}\right) \left(M + N\frac{U_{rf}}{pd}\right)^{-1} - \left(U_{rf} \pm \pi U_{dc}\right)^{2} \left[2\pi \left(M + N\frac{U_{rf}}{pd}\right)\right]^{-2} - \pi^{2} = 0.$$
(3.20), (3.21)

(б) $\beta = 0^0$: Двете полета имат еднаква посока и резултантното поле е максимално: $E_{dc,\Sigma} = E_{dc,in} + E_{dc,ex}$. В този случай в горния критерий се взима знак плюс, означен с (3.21).

Приближените стойности на константите са получени за експерименталните данни от [314] и [165]. Те са: A = 5.91189, B = 108.76559, M = 1.052994, N = 0.04039617.

• Приложение на модела

За прилагане на модела, стойностите на U_{rf} в (3.19) - (3.21) се намират като решения на тези нелинейни уравнения при зададени *pd*, напр. с Wolfram Mathematica.



Резултатите от изведените аналитични критерии са представени графично на Фиг. 3.16 и Фиг. 3.17, и са сравнени с други модели от литературата, както и с експериментални данни.

Изводи към Глава 3

3.1. Развити са смесени аналитично-числени модели за определяне на скаларния потенциал и интензитета на електричното поле във високочестотен газов разряд (съответно на хелий и аргон). Моделите се описват със смесена гранична задача за двумерно уравнение на Поасон в напречното сечение на разряда със смесени гранични условия. Тези параметри са съществени за цялостното поведение и определят основните показатели на газовия разряд, вкл. обемната плътност на мощността.

3.2. За аргонов разряд на базата на изчислените интензитет и потенциал на полето и други характеристики на разряда е определена газовата температура в напречното сечение на лазерната тръба чрез уравнението на топлопроводност и условия от Глава 2.

3.3. Проведени са компютърни симулации на изследваните характеристики на разрядите. Разгледани са различни случаи: род и налягане на инертния газ, различни типове разряд (слаботоков и силнотоков), извършено е сравняване с експериментални данни и сходни аналитични и числени резултати, извършена е корекция на методиката, схемните решения, с цел по-пълно съответствие и адекватност с експерименталните резултати. Установена е добра съгласуваност с известни експериментални данни и едномерни модели.

3.4. В параграф 3.3 е решена задачата за поддържане на устойчивост на високочестотен хелиев разряд на базата на пресмятане на потенциала и интензитета на електричното поле. Изследвани са условията за преход от слаботоков към силнотоков разряд в напречното сечение на тръбата с цел установяване възможност за възникване на предварителен пробив. Предложени са и числено са изследвани решения за получаване на стабилността на разряда, в смисъла на критерия на Таунсенд, което позволява контрол на пробивния процес. Получени са различни зависимости на пробивните напрежения при фиксирано електродно

напрежение или фиксирана електрическа мощност като функция на налягането на инертния газ. Основен резултат от компютърните симулации е, че са определени параметри, при които налягането на газа може да се повиши в рамките на 30% с гарантиран пробив и устойчива работа на прибора в у форма на разряда.

3.5. В параграф 3.4 за ВЧ капацитивен аргонов разряд при ниско налягане в комбинирани електрични полета са получени два нови модифицирани аналитични нелинейни критерия за контролиране на пробивното напрежение чрез апроксимиране на кривата на пробива като неявна функция на параметъра *pd*. Получено е много добро съответствие с експерименталните резултати и подобрение на резултати на други автори.

3.6. Всички компютърни симулации с моделите са реализирани с авторски кодове на Майкрософт Фортран и Wolfram Mathematica, част от тях са имплементирани в прототипа на авторската система LasSim [95].

Глава 4. Приложение на многомерен статистически анализ за изследване на параметрите на ЛМП

Представени са резултати от обработката на данни за основните характеристики на ЛМП чрез факторен анализ, регресия с главните компоненти, йерархичен клъстерен анализ. Моделите са приложени за оценка, анализ и прогнози на експеримента.

4.1. Приложение на метода на регресия с главните компоненти за лазер с пари на меден бромид [D5]

На базата на експериментални данни за лазер с пари на меден бромид са приложени факторен анализ и регресионен анализ с главните компоненти за изследване взаимовръзките между 6 основни оперативни лазерни променливи като диаметър на тръбата, входна електрическа мощност, налягане на водорода, и други върху изменението на основната изходна лазерна характеристика – изходната лазерна мощност. С помощта на факторен анализ променливите са класифицирани (групирани) в 3 фактора. С тях са построени регресионни модели на изходната мощност, т.е. приложен е метод на регресия с главните компоненти. Проведен е анализ на грешките и проверка на адекватността на статистическите модели. Постигнато е добро съответствие на получените модели с реалните данни. Моделът е приложен за прогнозиране на бъдещи експерименти като е постигнато до 18% възможно повишаване на максималната изходна мощност.

4.2. Класификация на основните параметри на УВ лазер с йерархичен клъстерен анализ [D6]

Този параграф съдържа резултатите от моделиране с цел класификация на 12 основни параметри на УВ лазер и изходната лазерна мощност. С помощта на агломеративни йерархични методи са построени клъстерни модели. Резултатите са приложими в компютърното моделиране и планиране на експериментите за по-нататъшно развитие на УВ лазер с подобрени изходни характеристики.

4.3. Многомерен анализ за изследване на времето на живот на УВ лазер [D13]

На практика отсъстват публикации, свързани със срока на служба на лазерното изделие. Тази изходна величина е изключително важна за експлоатацията на лазера като цяло и присъства навсякъде в характеристиките на лазерния източник. Целта е чрез обработка на данните за първи път да се изследва зависимостта на срока на служба на конкретен УВ лазер от основните независими величини и каква е степента на влиянието им. Разглеждат се следните 10 независими величини: D (mm) – вътрешен диаметър на лазерната тръба; DR (mm) – вътрешен диаметър на пръстените; L (cm) – разстояние между електродите (дължина на активната зона); PIN (kW) – входна мощност с отчитане на загубите; PH2(Torr) – налягане на добавъчния газ водород; PL(W/cm) – специфична мощност на единица дължина; PRF (kHz) – честота на повторение на импулсите; PNE (Torr) – налягане на буферния газ неон; C (nF) – еквивалентен капацитет на кондензаторната батерия; TR (°C) – температура на резервоара с меден бромид.

Ltime – срок на служба на лазерния източник е зависима изходна величина.

В изследването са използвани резултатите от n=238 експеримента.

• Резултати от факторния анализ

При факторния анализ групирането на променливите се извършва по критерия корелация. С тази техника се извършва групирането на тези, които корелират помежду си в общ фактор и разделянето на некорелиращите в различни фактори. Групирането на променливи в общ фактор означава, че те са свързани тясно помежду си.

Основен елемент на факторния анализ е корелационната матрица, съдържаща корелационните коефициенти между всеки две от избраните променливи. Наблюдават се големи по абсолютна стойност корелационни коефициенти, което показва наличие на мултиколинеарност. Получено е, че две величини имат най-висок коефициент на корелация с изходната величина Ltime. Това са величините TR (-0.848) и PH2 (0.783). Доколкото може да се тълкуват асоциациите на база корелационен анализ, отрицателният коефициент за TR означава, че вероятната зависимост от линеен тип между *LTime* и TR е обратно пропорционална. Може да се очаква, че с увеличаване на температурата на резервоара на CuBr времето на живот на лазера намалява. За PH2 зависимостта с LTime е правопропорционална. Увеличаването на налягането на водорода увеличава срока на служба на лазерния източник. Тези тенденции имат своето физическо обяснение и са в определени граници. Коефициентът на корелация между LTime и величината С е много малък (0.067) т.е. на този етап няма корелация между тях. По-нататък са получени и нелинейни модели, с които ще се установят по-точно зависимостите между променливите на УВ лазер.

Детерминантата на корелационната матрица е малка (без променливата *LTime* тя е 6.27.10⁻⁷), което индиректно показва съществуващ ефект на мултиколинеарност, тъй като матрицата е лошо обусловена. Изследваме по-подробно установяването на този факт с формалния статистически критерий за адекватност на извадката - теста на Кайзер-Мейер-Олкин и теста на Бартлет. В дадения случай КМО тестът е равен на 0.552>0.5, а значимостта на коефициента за сферичност на Бартлет е равна на нула. Можем да заключим, че факторният анализ е адекватен [132, 134, 299].

• Факторен анализ на независимите входни 10 величини

Една от особеностите на факторния анализ е това, че броят на групите (факторите), в които трябва да бъдат групирани величините, предварително не е известен и се определят от изследователя. Стандартно извличането на факторите се провежда с метода на главните компоненти.

В случая е приложен принципът на Кайзер и са избрани 3 фактора (3 собствени стойности са по-големи от 1). Три фактора в случая обясняват 80.27% от общата дисперсия на изследваните данни. От тях първата компонента (фактор) обяснява 38.34% от сумарната дисперсия, вторият фактор обяснява 28.67% и третият фактор обяснява 13.26%. Можем да приемем, че обяснението на над 80% от всички данни е удовлетворително и съдържа основната информация за извадката. Може да се използват също 4 фактора, които обясняват 86.5% от дисперсията. Тази възможност е алтернативна.

На следващия етап се извършва въртене на факторите с цел създаване на по-проста структура и ясно разграничаване на факторите. При това групирането на променливите по

фактори трябва да се постига така, че всяка променлива да участва с преобладаващо тегло само в един фактор и с възможно по-малки тегла в останалите фактори. Въртенето бе извършено с различни методи. На Табл. 4.19 а), б) привеждаме резултатите от ортогонално въртене на 3 фактора с метода Варимакс и наклонено въртене с Промакс. Разгледани са 4 факторни решения – 2 трифакторни и 2 четирифакторни, с Варимакс и Промакс.

Сравнението показва, че и четирите факторни решения са приемливи. В четирифакторните решения променливата С се отделя в самостоятелен 4-ти фактор, за разлика от 3-факторните решения. За Варимакс в матриците малките тегла са под 0.360, а за Промакс – под 0.300, като най-добре са разграничени факторите в случая на Промакс въртене с 3 фактора. По-нататък, за да не утежняваме изследването с много близки модели, ще използваме трифакторните решения с Варимакс и Промакс.

Полученото трифакторно решение е следното:

$$F_1 = \{DR, PNE, D, L\}, F_2 = \{PL, Pin, PRF\}, F_3 = \{PH2, TR, C\}.$$
(4.15)

Полученото четирифакторно решение е:

$$F_{1}' = \{DR, PNE, D, L\}, F_{2}' = \{PL, Pin, PRF\}, F_{3}' = \{PH2, TR\}, F_{4}' = \{C\}.$$
(4.16)

Табл. 4.19. Матрици на въртене с 3 фактора на 10 главни компонента за УВ лазер по метода: а) Варимакс; б) Промакс.

_	Component						
	1	2	3				
DR	949	039	106				
PNE	.914	.090	034				
D	890	186	102				
L	.823	.139	.009				
PL	.127	.959	067				
Pin	.364	.900	055				
PRF	021	.711	367				
PH2	.100	168	.883				
TR	023	.250	882				
С	.017	.010	.742				

a) Rotated Component Matrix^a

б) Pattern Matrix

	/						
	Component						
	1	2	3				
DR	969	.077	031				
PNE	.939	043	103				
D	878	090	061				
L	.828	.032	041				
PL	060	1.011	.100				
Pin	.198	.914	.079				
PRF	128	.708	250				
PH2	.037	033	.890				
TR	.026	.111	880				
С	071	.147	.783				

Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Promax with Kaiser Normalization.

Тези факторни решения тълкуваме като тип класификация. Тъй като част от променливите във факторите участват с отрицателен знак, няма директно съответствие с класификацията от клъстерния анализ, където разстоянията са положителни. Наблюдава се устойчивост на факторните решения.

Генерираните латентни променливи (фактори) ще могат да се използват като независими променливи при регресионен анализ, вместо силно корелиращите изходни променливи.

• Факторен анализ на независимите входни 10 величини и LTime

За да класифицираме LTime провеждаме отново същите факторни анализи, с добавяне на LTime. Получените тегла показват, че пренебрегнатите тегла на корелацията при Варимакс

са с най-голяма стойност 0.380, а тези в Промакс – с 0.250. Може да се заключи, че Промакс моделът е по-точен. По същество получаваме еднакви факторни решения, а именно:

$$F_1^{LT} = \{DR, PNE, D, L\}, F_2^{LT} = \{TR, PH2, LTime, C\}, F_3^{LT} = \{PL, Pin, PRF\}.$$
(4.17)

Факторните тегла са корелационни коефициенти между променливите и факторите. Така променливите *LTime*, *TR*, *PH2*, *C* корелират с втория фактор F_2^{LT} от (4.17), като стойността на корелацията за LTime е 0.837, *TR* корелира с отрицателен знак (-0.942), *PH2* – с 0.927 и *C* – с 0.535. В нашия случай получените трифакторни завъртени решения са напълно удовлетворителни по всички критерии на ФА.

• Резултати от регресия с главните компоненти

Регресионен анализ (PA) се използва за построяване на модели, описващи количествено връзките между няколко независими променливи (предиктори или регресори) $X_1, X_2, ..., X_p$ и една (или повече) зависими от тях променливи (отклик).

В настоящия параграф, както бе казано, основната задача е да се установи степента на влияние на всяка една от 10 независими величини на зависимата LTime. За да се реши проблемът с мултиколинеарността използваме факторните променливи, за които е проверено, че са независими помежду им.

С помощта на четирифакторния модел (4.16) с факторите от Промакс въртене получаваме линеен регресионен модел с характеристики: R^2 =0.869, Adj. R^2 =0.866. Значимостта на модела е 0.000. От анализа на колинеарната статистика виждаме, че VIF = 1 < 10 за всичките 4 фактора, т.е. те могат да се считат за неколинеарни. Стандартизираното уравнение е:

$$LTime = 0.110F_1' - 0.164F_2' - 0.881F_3' - 0.230F_4'.$$
(4.22)

Сравнението на експерименталните стойности със стандартизираните предсказани значения на LTime е илюстрирано на Фиг. 4.15. Стандартизираните остатъци имат разпределение близко до нормалното разпределение.

Моделът (4.22) с 4 фактора и Промакс въртене има от ФА 86.5% дисперсия, и дава значително висок коефициент на детерминация $R^2 = 87\%$. Следва да приемем като по-добро четирифакторното решение (4.16).



Фиг. 4.15. Сравнение на експерименталните стойности на *LTime* с предсказаните стандартизирани стойности от модела с 4 фактора с Промакс въртене.

Изводи към Глава 4

4.1. Между променливите на лазер с пари на меден бромид (CuBr) бе установено наличие на добре изразена мултиколинеарност. От всички 10 изследвани независими

променливи бяха определени 6 основни. Те корелират с изходната лазерна мощност. Тези променливи са: D, dr, L, Pin, PL, PH2.

4.2. С помощта на факторен анализ за 25%-на случайна извадка бе показано, че 6-те основни променливи се групират в 3 фактора, описващи 93.6% от общата дисперсия. На базата на факторите е проведена многомерна линейна регресия с главните компоненти и е получено регресионно уравнение на зависимостта на разглежданите 3 фактора с изходната мощност. Уравнението описва 93% от извадката.

4.3. С помощта на регресионния модел са направени прогнози за бъдещи експерименти за CuBr лазер, които показват възможност за повишаване на лазерната изходна мощност до 18% спрямо най-високата измерена изходна мощност от 120W.

4.4. Чрез прилагане на йерархичен клъстерен анализ за 12 и 8 променливи на УВ йонен лазер (за извадка с *n*=136 наблюдения) е получено оптимално клъстерно решение с 4 клъстера. Изходната лазерна мощност се групира в общ клъстер с променливите Pin и Prf, т.е. те имат най-голямо влияние върху мощността.

4.5. За пръв път за ЛМП е проведен статистически анализ за времето на живот на устройството, в случая за УВ йонен лазер, на базата на n=238 експериментални данни. С клъстерен анализ за 10 независими лазерни променливи е получено оптимално решение с 3 клъстера. Има голямо съответствие с решението от извод 4.4. Променливата LTime (време на живот) се класифицира в общ клъстер с PH2 и С.

4.6. С факторен анализ за времето на живот LTime на УВ лазер са получени класификации с 3 и 4 факторни решения. С извлечените фактори от 4-факторното решение е получено регресионно уравнение за LTime по метода на регресия с главните компоненти. Уравнението описва 87% от извадката.

4.7. Направена е физическа интерпретация на резултатите за всички модели.

Глава 5. Приложение на интелигентни методи за извличане на знания от данни за моделиране на зависимости и класификации за лазери с метални пари

В тази глава са развити, анализирани и приложени модели на базата на интелигентни методи за извличане на знания от данни (data mining) за моделиране на изходни характеристики на три типа лазери с метални пари – лазер с пари н меден бромид, излъчващ във видимата област (CuBr), лазер с пари на меден бромид, излъчващ в ултравиолетовия диапазон (UV Cu+ Ne-CuBr) и лазер с пари на стронциев бромид (He-SrBr2). Използвани са методите: MAPC (многомерни адаптивни регресионни сплайни) и CART (Класификационни и регресионни дървета). Методите се прилагат съчетани с машинно обучение с кросвалидация, използван прийом в изкуствения интелект.

5.1. Приложение на многомерните адаптивни регресионни сплайни за моделиране на изходната мощност на УВ лазер [D7]

Представени са основните възможности на сравнително новата статистическа техника – Многомерни Адаптивни Регресионни Сплайни (МАРС) и съпътстващия я софтуерен продукт. Проведено е конкретно изследване на експериментални данни за моделиране на изходната лазерна мощност ултравиолетов йонен лазер с пари на меден бромид. Получените резултати имат добро съвпадение с реално изследваните случаи. Показано е, че построените

непараметрични МАРС модели могат да се използват за оценка и предсказване на настоящи и бъдещи експерименти, с цел повишаване на изходната лазерна мощност.

5.2. Моделиране на изходните характеристики на УВ йонен лазер с МАРС метод с разширена извадка [D9]

С помощта на метода МАРС са построени непараметрични регресионни модели за описание на две основни изходни лазерни характеристики - изходна лазерна мощност и срок на служба на лазерите. Моделите са построени като явни функции на 9 входни лазерни величини. Получени са модели без и с взаимодействие между тези входни величини, с отчитане на локалните нелинейности на зависимостите в различни многомерни подобласти. Получените МАРС модели обясняват над 98% от всички изследвани данни. Построените модели са използвани за оценка на изследваните изходни лазерни характеристики на съществуващите УВ лазери. Демонстрирана е възможността за използване на моделите за предсказване на бъдещи експерименти. Приведени са конкретни анализи за сравнение на моделите с реалните експерименти с цел насочване на експеримента.

5.3. Моделиране на изходната мощност на лазер с пари на меден бромид с метода МАРС [D10]

В този параграф се представят резултати от моделиране на експерименталните данни на лазер с пари на меден бромид (CuBr лазер) с помощта на интелигентни методи. Изследва се зависимостта на изходната лазерна мощност от 10 входни величини с помощта на гъвкавата непараметрична техника МАРС, като се отчитат линейни и нелинейни локални зависимости. Получени са класове от регресионни модели, които описват до 98-99% от данните, с точност, съизмерима с точността на експеримента. Моделите се прилагат за оценка и прогнозиране на мощността на съществуващи и бъдещи лазерни устройства. Резултатите са сравнени с порано получени оценки с параметрични методи.

5.4. Моделиране и симулации на изходната мощност на лазер с пари на стронциев бромид с метода МАРС [D11]

Това проучване изследва приложимостта на МАРС [83, 103] за построяване на регресионни уравнения на изходната мощност на SrBr2 лазер, с използване на експериментални данни за 7 основни независими лазерни променливи. Задачите са:

- 1) Определяне на най-адекватния тип явни зависимости на изходната лазерна мощност от входните лазерни величини чрез конструиране на МАРС модели;
- 2) Намиране на зависимости, отчитащи както локално линейните, така и локално нелинейните зависимости;
- 3) Приложение на моделите за предсказване на съществуващ и бъдещ експеримент.

• Описание на данните

Изследваните експериментални данни за SrBr₂ лазер са получени в Лабораторията по лазери с метални пари, ИФФТ на БАН и са публикувани в [245-248]. Патентите са от 2006 и 2012 г. [267, 270]. Примерна схема на лазерната тръба е дадена в 2.1.3.

Независими променливи (предиктори) на анализа са следните 7: D1(mm) – вътрешен диаметър на кварцовата тръба; D2 (mm) – вътрешен диаметър на вмъкнатата керамична тръба; La (cm) – дължина на активната зона (разстояние между електродите); Ceq (pF) – еквивалентен капацитет на кондензаторната батерия; PIN2 (kW) – подавана в разряда електрическа мощност, с 50% загуби; PRF (kHz) – честота на повторение на импулсите; PNE (Torr) – налягане на буферния газ хелий.

Зависима изходна характеристика (отклик) е изходната лазерна мощност Pout, W.

В изследването се използват данни от n = 167 проведени експеримента. Чрез V ще означаваме стойностите на седемте независими променливи (предиктори) за даден отделен експеримент. Фиксираме следната подредба на променливите:

$$v = (D1, D2, La, Ceq, Pin2, Prf, PHe).$$
 (5.30)

Например, максималната изходна лазерна мощност *Pout* = 4.26 W е измерена в експеримента [245]:

$$v_{167} = (46, 19.8, 98, 632.3, 1.05, 19, 44.7).$$
 (5.31)

Трябва да отбележим, че данните нямат нормално разпределение, и в частност данните за изходната лазерна мощност. По тази причина прилагането на традиционни параметрични статистически методи е затруднено. Това условие, както вече изяснихме, не е съществено за непараметричните методи от типа на МАРС.

• Построяване на класове от МАРС модели на изходната мощност на стронциев лазер

Тъй като очакваме, че зависимостта между входните 7 променливи и изходната лазерна мощност е по-сложна и съдържа локални нелинейности, построяваме и модели от втори ред. Бяха изчислени всички модели с вариране на контролния параметър за максималния начален брой базисни функции M_0 от 15 до 50. Моделът с най-добри статистически индекси се получи при максимален брой от $M_0 = 35$ базисни функции, с до втора степен на взаимодействие. Моделът съдържа следните 24 базисни функции (оригиналната номерация на базисните функции от МАРС е запазена):

$BF1 = \max(0, D1 - 46)$	$BF15 = \max(0, 38 - PHe) BF1$	
$BF2 = \max(0, \ PHe - 45)$	$BF18 = \max(0, Ceq - 398) BF2$	
$BF3 = \max(0, \ 45 - PHe)$	$BF19 = \max(0, Ceq - 632.3)$	
$BF5 = \max(0, \ 1.0375 - Pin2)$	$BF20 = \max(0, \ 632.3 - Ceq)$	
$BF6 = \max(0, Pin2 - 0.7) BF1$	$BF21 = \max(0, Pin2 - 0.7) BF19$	
$BF7 = \max(0, Pin2 - 0.975) BF3$	$BF22 = \max(0, Ceq - 429)$	$(\mathbf{F}, \mathbf{Q}_{\mathbf{C}})$
$BF8 = \max(0, \ 0.975 - Pin2) \ BF3$	$BF23 = \max(0, 429 - Ceq)$	(5.30)
$BF9 = \max(0, Ceq - 632.3) BF3$	$BF24 = \max(0, Pin2 - 0.7) BF23$	
$BF11 = \max(0, Prf - 15) BF1$	$BF26 = \max(0, 46.25 - PHe)$	
$BF12 = \max(0, Ceq - 632.3) BF1$	$BF27 = \max(0, Ceq - 632.3) BF26$	
$BF13 = \max(0, \ 632.3 - Ceq) \ BF1$	$BF29 = \max(0, Pin2 - 0.975) BF26$	
$BF14 = \max(0, PHe - 38) BF1$	$BF34 = \max(0, \ 0.925 - Pin2) \ BF20$	

Съответното получено нелинейно уравнение на МАРС модела за *Pout* включва 22 от функциите (5.36) и се записва във вида:

Pout = 9.70213 - 3.67244 BF1 - 0.776352 BF2 + 0.0783748 BF3 - 12.0111 BF5 + 7.31155 BF6 + 3.46542 BF7 + 2.93396 BF8 - 0.00267527 BF9 + 0.0347074 BF11 - 0.00628029 BF12 + 0.000783615 BF13 + 0.471473 BF14 - 0.488063 BF15 + 0.0020066 BF18 + 0.0323112 BF19 - 0.026751 BF20 - 0.0401278 BF21 - 0.0246963 BF22 + 0.221547 BF24 + 0.00257532 BF27 (5.37)

-4.87965 BF 29 + 0.0068113 BF 34

В модела (5.36) - (5.37) от втори ред участват 5 предиктори, които са и в модела (5.34) - (5.35) от първи ред. Съответните приноси в моделите са дадени в Табл. 5.11. Частично взаимодействие от втора степен показаха следните групи променливи:

{D1, Pin2}, {Pin2, PHe}, {D1, PHe}, {Ceq, PHe}, {D1, Prf}, {D1, Ceq} и {Ceq, Pin2}.

Областите на най-съществените приноси на първите три групи са показани на Фиг. 5.23 а) – в), в ординални единици. На Фиг. 5.24 а) –б) са показани слайси от 2 групи от Фиг. 5.23.

За сравнение с линейния модел (5.34) - (5.35) за случая V_{167} с използване на данните

(5.31), от уравнения (5.36) - (5.37) ще получим $Pout_{167} = 4.23 \text{ W}$, което доста по-добре приближава експериментално измерената стойност $Pout_{167} = 4.26W$. Графиката на приближението на модела към отклика е дадена на Фиг. 5.25.

Ще отбележим, че МАРС моделът от втори ред (5.36) - (5.37) съдържа шест базисни функции от линейния модел (5.34) - (5.35) и по-точно: *BF*1, *BF*5, *BF*11, *BF*9, *BF*10, и *BF*15, като последните 3 са в събираеми от втора степен.



Фиг. 5.23. Графики на приноса на избрани двойки предикторни променливи в МАРС модел (5.36) - (5.37) в ординални единици.



Фиг. 5.24. Примери за отрези от приноса на избрани двойки предиктори в МАРС модела (5.36) - (5.37): а) отрез от Фиг. 5.23 а); б) отрез от Фиг. 5.23 в).

Променливи	В модел (5.34)-(5.35)	В модел (5.36)-(5.37)
D1, mm	100	100
Pin2, kW	62.4	71.3
<i>Ceq</i> , pF	27.7	38.8
PHe, Torr	20.5	45.4
<i>Prf</i> , kHz	9.9	14.9

Табл. 5.11. Относителен принос на началните променливи в МАРС моделите от първи и втори ред на лазерната мощност *Pout* на SrBr₂ лазер.

Уравнение (5.37) има коефициенти на детерминация R^2 =0.99651 и GCV R^2 =0.99052 след 10%-разделна кросвалидация с машинно обучение. Може да се приеме, че МАРС моделът (5.37) от втори ред описва над 99% от моделните данни. Статистическата значимост на модела е P = 0.000005, а на коефициентите е $P \le 0.0012$.

Освен това бяха получени и анализирани и модели от трети ред. Техните свойства не се отличават качествено от моделите от втори ред, имат несъществено по-ниски статистически показатели и имат по-сложен вид.



Фиг. 5.25. Сравнение на експерименталните стойности на изходната мощност с оценките *PoutPredicted* по МАРС модела от втори ред (5.36) - (5.37) с 5%-тен доверителен интервал.

Анализ на резултатите и приложения на модела Анализират се **четири основни аспекта** от приложения на МАРС моделите.

• Съответствие на модела с експеримента

Пряко приложение на МАРС моделите е възможността за оценяване на даден експеримент. В предния параграф 5.4.2 е показано, как се изчисляват предсказаните стойности с помощта на моделите.

Всички получени резултати показват много добро съвпадение на теоретичните модели с експеримента. Избраният най-добър МАРС модел от първи ред (5.34) - (5.35) отстъпва по качества на модела от втори ред (5.36) - (5.37). Тъй като моделите от трети ред не подобряват статистическите индекси, получени дотук, можем да заключим, че моделите от втори ред и в частност най-добрият модел с уравнения (5.36) - (5.37) достатъчно адекватно описва изследваните лазерни данни. Изключително високите му показатели на съвпадение дават GCV $R^2 = 99\%$ описание на експерименталните данни.

По този начин се установи, че зависимостите между изследваните входни независими лазерни характеристики и лазерната генерация имат частично нелинеен характер от първа и втора степен в локални подмножества.

От сравненията на качествата на моделите следва, че моделът от втори ред е достатъчно добър и може да се използва за анализи и прогнози на експеримента.

• Приложение на моделите за анализ на локалните зависимости между входните параметри и изходната лазерна мощност

С помощта на МАРС моделите се откриват специфични основни локални взаимозависимости между предикторите и зависимата величина *Pout*. Това лесно се постига с изследване поведението на изходната мощност, в зависимост от базисните функции. В случая графичното представяне на тези взаимовръзки е много удобно. Например, в случая на линейния модел (5.34) – (5.35), графично се проследява влиянието на всяка отделна величина върху изходната мощност в съответните дефиниционни интервали на независимата променлива.

Например за нелинейния модел (5.36) - (5.37) силата на влияние на предикторите се проследява на тримерните графики от Фиг. 5.23 а) – в). Най-големите стойности за *Pout* се постигат при малки стойности на D1 от 46 до 46.5 mm и големи стойности на входната мощност *PIN2*. Ще отбележим, че при по-големи *PIN2* и *PNE* \geq 38 от Фиг. 5.23 б) се вижда, че *Pout* намалява. На Фиг. 5.23 в) отново оптимални стойности за повишаване на лазерната генерация се получават при $D1 \in [46, 46.5]$ mm и *PIN2* над 1 kW.

Локалните двумерни зависимости могат да се изследват по-подробно с помощта на графики, съдържащи отрези (слайси) от тримерните графики. При фиксиране на едната променлива, се наблюдава влиянието на другата. Това е илюстрирано на Фиг. 5.24. Избраният слайс от Фиг. 5.24 а) показва максималният принос на двойката $\{D1, PHE\}$, който се постига при $D1 \in [46.3, 46.5]$ *mm* и $PHe \in [43, 46]$ *Torr*. На Фиг. 5.24 б) е илюстрирано поведението на PIN2 при фиксирана стойност на D1=46.5 *mm*.

С това е показано предимството на получените МАРС модели за извличане на основните съществени връзки в данните и възможността за детайлно изследване на локалните взаимозависимости между основните лазерни параметри.

• Приложение на MAPC моделите за оптимизиране на входните лазерни параметри

Друг основен резултат е получената класификация на степента на влияние на независимите променливи върху изходната мощност (Табл. 5.11). Наблюдава се еднакво участие на 5 основни предиктора за моделите от първи и втори ред, като местата на *PHE* и *CEq* са разменени, макар и с не голям превес. Най-съществено влияние върху *Pout* имат вътрешният диаметър на лазерната тръба *D*1, подадената електрическа мощност *PIN*, налягането на буферния газ хелий *PHE*, еквивалентен капацитет на кондензаторната батерия *Ceq* и в най-малка степен – честота на импулса *PRF*.

Тази класификация следва да се има в предвид при планиране на експеримента на устройства от същия тип и да не се нарушава съществено.

• Планиране на бъдещ експеримент

Чрез внимателно изследване на оценките на реалните експерименти, получени с даден МАРС модел, е възможно насочването на бъдещ експеримент и пресмятане на съответната предсказана прогнозна изходна мощност. Това е демонстрирано на Табл. 5.12. Проследява се стабилно поведение както за вътрешен диаметър на тръбата D1=46.35 mm, така и за диаметър D1=46.5 mm. Изборът на стойностите на променливите е обяснен по-горе в този параграф. Резултатите показват възможност за повишаване на изходната мощност с до 25%.

Табл. 5.12. Прогнозни стойности на изходната лазерна мощност *Pout* на лазер с пари на стронциев бромид, получени с нелинейния МАРС модел (5.36) - (5.37).

D1,	D2,	La,	Ceq,	Pin2,	Prf,	PHe,	Predicted
mm	mm	cm	pF	kW	kHz	Torr	Pout, W
46	19.8	98	632.3	1.10	19	43	3.722
46	19.8	98	650.0	1.05	19	42	4.079
46	19.8	98	632.3	1.05	19	43	4.169
46	19.8	98	650.0	1.05	20	44	4.138
46	19.8	98	632.3	1.05	20	44	4.196
46	19.8	98	632.3	1.05	19	45	4.224
46.35	19.8	98	632.3	1.10	19	43	4.334
46.35	19.8	98	650.0	1.05	19	42	4.359
46.35	19.8	98	632.3	1.05	19	43	4.653
46.35	19.8	98	650.0	1.05	20	44	4.760
46.35	19.8	98	632.3	1.05	20	44	4.857
46.35	19.8	98	632.3	1.05	19	45	5.038
46.5	19.8	98	632.3	1.10	19	43	4.596
46.5	19.8	98	650.0	1.05	19	42	4.479
46.5	19.8	98	632.3	1.05	19	43	4.860
46.5	19.8	98	650.0	1.05	20	44	5.027
46.5	19.8	98	632.3	1.05	20	44	5.141
46.5	19.8	98	632.3	1.05	19	45	5.387

5.5. Приложение на метода на класификационните и регресионни дървета за моделиране на изходната мощност на лазер с пари на меден бромид [D12]

Изследвани са наличните експериментални данни за CuBr лазер. На базата на данни за 10 независими входни параметри се оценява изходната лазерна мощност. Прилага се CART методът, с който са построени класификационни и регресионни дървета на зависимостите. За случая на линеен модел е получено качество на приближението 98%, а за двумерния – 99%. Получените CART дървета отчитат кои входни величини и до каква степен влияят за всяка от класификационните групи. Това дава възможност да се оцени технологично кои от тях са най-съществени при изработката и функционирането на разглеждания тип лазер при избрана стойност на изходната лазерна мощност и да подпомага съществено процеса на неговото проектиране и по-нататъшно технологично развитие.

Изводи към Глава 5

5.1. Построени са и са анализирани начални МАРС модели на изходната лазерна мощност Pout на УВ йонен лазер в надлъжен импулсен разряд, с 8 независими променливи, с редуцирана извадка от n=176 експеримента. Най-добрите модели са от 3-ти ред. С проведена 10-разделна кросвалидация на обучение, най-добрите модели достигат GCV R^2 =94.5% съвпадение с данните.

5.2. Построени са подобрени класове МАРС модели на изходната лазерна мощност *Pout* на УВ йонен лазер с 9 променливи и извадка от n=238 експеримента. Установено е, че найдобрите МАРС модели са нелинейни, съдържащи членове до втора степен. От използваните 9 независими променливи като предиктори, влияние върху изходната лазерна мощност оказват 8 от тях, като най-съществено е влиянието на налягането на приложената електрическа мощност Pin, вътрешния диаметър на лазерната тръба D (диаметър на пръстените), налягането на буферния газ неон *Pne*, налягането на водорода *PH*2. Моделите показват отлични предсказващи качества, съгласувани добре с експеримента. Дадени са приложения на моделите за предсказване на съществуващи и бъдещи експерименти. Постигнато е GCV *R*²=96.5% съвпадение на модела с експеримента.

5.3. Построени са класове от МАРС модели на времето на живот на УВ лазер с 9 променливи и извадка от n=238 експеримента. Те имат по-прост вид от тези на изходната мощност и в тях съществено влияние оказват само 3 лазерни характеристики: температура на резервоарите с меден бромид, налягане на неона и капацитет на кондензаторната батерия. Постигнато е GCV R^2 =99.7% съвпадение на модела с експеримента.

5.4. Построени са класове от МАРС модели за изходната мощност на лазер с пари на меден бромид (CuBr) на базата на 10 променливи, n=387 експеримента. Моделите от трети ред имат най-добри качества, с GCV R^2 =99.0% съвпадение с данните. Идентифицирани са шест ключови променливи, които оказват най-съществено влияние върху изходната мощност на лазерите. Моделите са приложени за прогнозиране на изходната мощност на бъдещи устройства, като е изчислена възможност за увеличение до 25%.

5.5. Построени са МАРС модели за изходната мощност на лазер с пари на стронциев бромид (SrBr2) с използване на 7 променливи и извадка от n=167 експеримента. Установено е, че нелинейният МАРС модел от втори ред най-адекватно описва зависимостта на лазерната генерация от 5 входни независими променливи – вътрешен диаметър на кварцовата тръба, входна електрическа мощност, еквивалентен капацитет на кондензаторната батерия, налягането на буферния газ хелий и честотата на лазерните импулси. Моделът има много добро съвпадение с експерименталните данни, с GCV R^2 =99.1%. С негова помощ са установени областите на локалните нелинейни зависимости и поведение на изходната лазерна мощност. Получените резултати са използвани за оценка и предсказване на съществуващите и бъдещи експерименти.

5.6. Анализирани са подробно 4 аспекта на приложение на построените модели:

- Постигане на висока степен на съответствие на моделите с експерименталните данни.
- Способност на моделите да описват качествено линейни и нелинейни локални зависимости и възможност за изследване в предсказване в предпочитани части от многомерни области.
- Приложение на моделите за идентифициране и оптимизиране на основните променливи, според степента им на влияние в модела.
- Приложение на моделите за предсказване на характеристики на бъдещи устройства.

5.7. Построени са CART регресионни модели на базата на дърво на решенията, с което се класифицират групи от сходни експерименти спрямо стойностите на изходната мощност на CuBr лазер. Използвани са данните за 10 лазерни променливи от n=387 експеримента. Получени са най-добри модели от линеен и нелинеен тип. Постигнати са качество на приближение с данните до GCV $R^2=98.1\%$ за линейни модели и GCV $R^2=98.7\%$ за тези с до втора степен на предикторите. Установени са правилата за достигане на най-високите стойности на Pout. Основно влияние имат входната мощност, капацитетът на кондензаторната батерия и честотата на импулсите.

5.8. Преопределянето и адекватността на моделите се контролира с кросвалидация с машинно обучение.

5.9. За всички резултати е представена физична интерпретация.

5.10. Развитата методика с методите МАРС и САRТ може да бъде използвана за изследване и на други подобни устройства, в помощ на изследователите и конструкторите на лазери и лазерни технологии.

Глава 6. Приложение на стохастично моделиране за изследване на чистотата на въздуха

В тази глава са развити, анализирани и приложени стохастични модели за изследване и прогнозиране на временни редове на концентрации на различни замърсители на въздуха в населени места на България. Разгледани са следните задачи:

- Изследване и моделиране на зависимостите между 6 едномерни временни реда на концентрациите на замърсителите на въздуха на град Благоевград и приложение на моделите за краткосрочни прогнози;
- Изследване на замърсяването на въздуха с фини прахови частици (ФПЧ10, РМ10) в град Шумен в зависимост от метеорологичните данни и прогнозиране;
- Моделиране на временните редове на замърсяванията на въздуха с ФПЧ10 и серен диоксид (SO2) на град Кърджали и прогнозиране.

6.1. Приложение на факторен анализ и едномерен стохастичен SARIMA метод за изследване концентрациите на замърсители на въздуха на град Благоевград [D15]

Изследвани са 6 замърсителя на атмосферния въздух в град Благоевград, типичен средноголям град в България. Приложени са два статистически подхода за описание на реалните данни в рамките на период от една година, на базата на почасови измервания. Данните са обработени с помощта на факторен анализ, което доведе до тяхното групиране в 3 основни фактора, идентифициращи комбинираното замърсяване. Това е обяснено с наличието на конкретни общи източници на замърсителите в получените групи.

Основната част от резултатите са получени с помощта на прилагането на SARIMA модели за 6 замърсителя. По-конкретно, резултатите показват, че PM10 надвишава официалните национални и европейски норми, ето защо състоянието на този екологичен индикатор е силно обезпокоителен. За замърсяването с озон е установена положителна тенденция от първа степен. Моделите са приложени за краткосрочно прогнозиране в рамките на период от 72 часа, като резултатите демонстрират много добри характеристики при сравнение с реалните данни. Най-добрите модели са получени и избрани на базата на информационния критерий ВІС и други често използвани критерии за оценка. Като цяло е установено, че факторният анализ и SARIMA подходът са много подходящи инструменти за изследване на нивата на замърсяване на въздуха в малки населени места с цел подпомагане на ежедневния контрол и прогнозиране по отношение на качеството на въздуха.

6.2. Приложение на метода SARIMA с трансферни функции за изследване концентрациите на фини прахови частици за град Шумен в зависимост от метеорологичните променливи [D14]

Конкретните цели на изследването са:

- Провеждане на анализ на временния ред на ФПЧ10 с помощта на стохастични SARIMA модели с трансферните функции, вземащи предвид периодичността (по часове) и зависимостта от 6 метеорологични променливи;
- 2) Анализ и оценка на получените модели;
- 3) Прилагане на моделите за краткосрочно прогнозиране в рамките на 96 часа след периода на моделиране.

• Описание на използваните данни

Данните се отнасят до концентрациите на прахови частици (PM10), един от основните замърсители на въздуха на град Шумен. Те са за кратък период от 1 месец, считано от 28.11.2012 г. до 27.12.2012 г., в почасови данни. Измерванията са в стандартни единици масова концентрация на PM10 в µg/m³.

Като независими редове се използват шест метеорологични променливи, а именно: PRESS, hPa - атмосферно налягане; DVP, degree - посока на вятъра; TEMP, °C - температура на въздуха на нивото на земята; RADST, W/m² - слънчева радиация; UMR, % - относителна влажност на въздуха; VVG, m/s - скорост на вятъра.

Общият обем данни е от 718 до 816 случая, по часове. Максималният брой липсващи стойности (за всеки параметър) е по-малък от 1% и е без съществено значение. Липсващите данни са запълнени по метода на интерполация.

На Фиг. 6.22. е построена времевата графика на началните данни на РМ10.

Установяват се много високи концентрации на PM10 в рамките на избрания период, като систематично се надвишават препоръчителните количества, според европейските и националните норми, в т.ч. - среднодневно ниво под 50 microgram/m³ [66, 72]. Наблюдаваните стойности надвишават тази граница многократно, което е сериозен екологичен проблем за града. Ситуацията е критична особено през зимата. Това може да се обясни с широко разпространената употреба на твърдо гориво от домакинствата и индустрията, което е основен рисков фактор и вреди изключително много на здравето на населението.



• Трансформация на зависимата променлива

Използваните методи предполагат нормално разпределение на данните. За стабилизиране на дисперсията и подобряване на нормалността [279, 104] използваме степенната трансформация на Йео-Джонсън:

$$trx = \psi_{YJ}(\lambda, x) = \begin{cases} \left\{ (x+1)^{\lambda} - 1 \right\} / \lambda & x \ge 0, \lambda \ne 0 \\ \log(x+1) & x \ge 0, \lambda = 0 \\ -\left\{ (-x+1)^{2-\lambda} - 1 \right\} / (2-\lambda) & x < 0, \lambda \ne 2 \\ -\log(-x+1) & x < 0, \lambda = 2 \end{cases}, \qquad \lambda \in [-2,2]$$
(6.1)

където *x* е първоначалната променлива, *trx* е трансформираната променлива, а λ е неизвестен параметър. За РМ10 бе получено $\lambda = -0.1$.

• Описание на метода SARIMA/TF

В параграф 6.1. е дадено описание на едномерен SARIMA метод, при който временният ред зависи единствено от времето. Ако редът Y_t освен от времето зависи от един или повече предикторни реда $X_{1t}, X_{2t}, ..., X_{kt}$ методът се обобщава до SARIMA/Transfer function (TF) метод. Моделът с трансферни функции има следния общ вид [38, 39]:

$$\Delta^{d,D} f(Y_t) = \frac{MA}{AR} a_t + \sum_{i=1}^k \left(\frac{Num_i}{Den_i} \Delta_i^{si,Di} B^{b_i} f_i(X_{it}) \right) + \mu$$
(6.12)

където μ е константа, $\Delta^{d,D}$, $\Delta_i^{di,Di}$ са операторите на приближено диференциране на редовете с крайни разлики: $\Delta^{d,D} = (1-B)^d (1-B^s)^D$, $\Delta_i^{di,Di} = (1-B)^{d_i} (1-B^s)^{D_i}$, f, f_i са евентуални начални трансформации на зависимата променлива и на предикторите, B^{b_i} е член на закъснение с цял положителен ред b_i . Диференчните полиноми за авторегресия и плаващи средни са от вида:

$$MA = \left(1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q\right) \left(1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs}\right)$$

$$AR = \left(1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p\right) \left(1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{Ps}\right)$$
(6.13)

Числителят и знаменателят в (6.12) имат съответно вида:

$$Num_{i} = \left(\omega_{i0} - \omega_{i1}B - \omega_{i2}B^{2} - \dots - \omega_{iu}B^{u}\right)\left(1 - \Omega_{i1}B^{s} - \Omega_{i2}B^{2s} - \dots - \Omega_{iU}B^{Us}\right)$$

$$Den_{i} = \left(1 - \gamma_{i1}B - \gamma_{i2}B^{2} - \dots - \gamma_{iv}B^{v}\right)\left(1 - \Gamma_{i1}B^{s} - \Gamma_{i2}B^{2s} - \dots - \Gamma_{iV}B^{Vs}\right)$$
(6.14)

Моделните параметри, които се оценяват в (6.12) - (6.14) са:

$$\mu, \theta_j, \Theta_j, \varphi_j, \Phi_j, \omega_j, \Omega_j, \gamma_j, \Gamma_j.$$
(6.15)

Предварителните параметри на модела, които се задават преди оценката на (6.15) за зависимата променлива *Y* и предикторните временни редове *X_i* са:

$$p, d, q, P, D, Q, s; u, U, v, V, d_i, D_i, b_i$$
 (6.16)

От предварителното задаване на параметрите (6.16) зависи изборът на модел.

Моделът с трансферни функции (6.12) включва едномерните ARIMA/SARIMA модели като частен случай, ако от дясната част на уравнението се отстрани вторият член, съдържащ предикторните редове.

• Построяване на SARIMA/TF модел за trPM10 и приложение на модела

При построяването на модели на PM10, шестте наблюдавани метеорологични временни реда от параграф 6.2.1 се използват като независими променливи, а трансформираната променлива *trPM*10 е зависима променлива.

Първата стъпка в моделирането е определянето на параметрите на модела чрез изследване на разпределението в автокорелационната функция (ACF) и функцията за частична автокорелация (PACF) на временния ред. Поведението на ACF функцията предполага периодичност от s=24. Наличието на PACF в лаг 1, който е много близко до 1 е индикация, че диференчното уравнение на SARIMA има корен 1, т.е. има тренд и d=1. Също

така няколко върха в РАСГ функцията до лаг 4 ни помагат да определим, че *p* и *q* са между 1 и 4. В останалите лагове РАСГ са в доверителния интервал (виж напр. [13, 243]).

За определянето на предварителните входни параметри (несезонни, сезонни и циклични), бяха изчислени и оценени над 50 кандидат модела. Беше установено, че входните величини PRESS, RADST и DVP не оказват значително влияние върху стойностите на trPM10. Като най-добър за трансформирания ред на PM10 бе избран моделът

SARIMA
$$(2,1,1)(1,0,1)_{24}$$
. (6.17)

Установяването на нестационарност и наличието на тренд от първи ред, т.е. параметър d = 1, е установено с провеждане на обобщения тест на Дики-Фулър с помощта на софтуера EViews. Авторегресионният компонент е p = 2, т.е. най-силното влияние върху всяка текущата стойност на trPM10 е тази на предишните две (два часа). Компонентът на подвижните средни q = 1 показва, че локалните отклонения са изравнени с предходен член от временния ред. Сезонният авторегресионен компонент е (P=1), компонентата на плаващите средни е Q=1, като не се открива разлика в сезонната част.

Анализът на качеството на моделите се оценява с критериите от 6.1, с помощта на класическите мерки за временни редове: коефициент на детерминация R^2 , стационарен R^2 , RMSE (относителна средноквадратична грешка), MAE (средна абсолютна грешка) и информационен критерий на Шварц – BIC [221, 44]. Получени са високи стойности на R^2 =0.952 и стационарния R^2 =0.511, които показват процента от данните, обяснени от модела.

• Приложение на модела за предсказване и прогнози

Полученият модел (6.17) е приложен за предсказване на измерените концентрации, за първите 719 наблюдения. На Фиг. 6.26 вляво от вертикалната линия са сравнени измерените концентрации на ФПЧ10 и предсказаните от модела (6.17) след ретрансформиране към изходната променлива.



Фиг. 6.26. Наблюдаваните стойности на *PM*10, сравнени със стойностите на модела SARIMA(2,1,1)(1,0,1)₂₄ и 96 часова прогноза за град Шумен (вдясно от вертикалата). Хоризонталната черта указва допустимия среднодневен лимит от 50 µg/m³.

Установява се много добро съответствие. Моделът е приложен и за краткосрочно прогнозиране на 96 часов (4-дневен) бъдещ период, който не е използван в процеса на моделиране. За тази цел, метеорологичните параметри за следващите 96 часа са добавени до n = 816 времеви точки, а прогнозните концентрации на РМ10 са изчислени с помощта на модела. Резултатите са показани на Фиг. 6.26 отдясно на вертикалната линия.

Наблюдава се като цяло много добро качество на предсказването. Трябва да се отбележи доброто предвиждане на пиковите стойности на замърсяване с РМ10 (на 28 и 30 декември 2012 г. вечерта), като SARIMA моделът показва по-високи от реалните измерени стойности.

6.3. Изследване зависимостта на нивата на ФПЧ10 и серен диоксид от метеорологичните фактори със SARIMA/TF метод за данни за град Кърджали [D19]

Направен е емпиричен анализ на различни практически аспекти от стохастичното моделиране на замърсителите на град Кърджали – ФПЧ10 и серен диоксид (SO2) с метода SARIMA с трансферни функции. Построените и анализирани модели отчитат влиянието на метеорологичните променливи, предварителната трансформация на зависимите променливи, различни хоризонти на предсказване на бъдещите нива на замърсяване. Получените модели са с много добро качество както по съответствие с данните, така и с прогнозиране в кратки периоди. Моделите са валидирани с машинно обучение в рамките на различни кратки хоризонти от времеви интервали.

Изводи към Глава 6

6.1. С помощта на факторен анализ са изследвани 6 едномерни временни реда на концентрациите на замърсителите на атмосферния въздух на град Благоевград за период от 1 година на база на почасови данни. Редовете са групирани в 3 фактора, идентифициращи комбинирано замърсяване от общи източници.

6.2. Построени и анализирани са SARIMA модели за 6 замърсителя на град Благоевград. Установено е, че концентрациите на РМ10 надвишават официалните национални и европейски норми, ето защо състоянието на този екологичен индикатор е силно обезпокоителен. За замърсяването с озон е установена положителна тенденция от първа степен. Моделите са приложени за краткосрочно прогнозиране в рамките на период от 72 часа. Резултатите демонстрират много добри характеристики при сравнение с реалните данни. Най-добрите модели са получени и избрани на базата на информационния критерий BIC и други често използвани критерии за оценка.

6.3. Направено е статистическо проучване на концентрациите на фини прахови частици РМ10 в град Шумен за период от 1 месец на базата на почасови данни и с отчитане на 6 метеорологични фактори. Избраният период включва данни с най-високи стойности на замърсяването през годината, за което се установи положителен тренд. Получен е стохастичен модел по метода SARIMA с трансферни функции. От метеорологичните фактори влияние имат посоката на вятъра, влажността на въздуха и температурата в приземния слой. Моделът показва много добри качества на съвпадение със съществуващите данни, и с малка грешка, като отчита адекватно пикове и спадове в концентрациите. Моделът е приложен за 4-дневно предсказване на бъдещи замърсявания и са получени много добри резултати. Може да се заключи, че за данни с подобни характеристики методът е адекватен и може да се използва както за описание, така и за прогнозиране концентрациите на отделни проблемни замърсители на въздуха в населени места. Този тип анализи са алтернатива и възможност за независим контрол на показателите на чистотата на въздуха. Те могат да се прилагат за изследване на минали периоди и откриване на тенденции.

6.4. Построени и анализирани са SARIMA модели с трансферни функции за предсказване и прогнозиране на замърсяванията на атмосферния въздух на град Кърджали със серен диоксид SO2 и ФПЧ10. Изследвани са данни за период от 2 години и 3 месеца. Моделите използват като предиктори 5 метеорологични променливи. Крайният модел се избира след провеждане на моделиране без трансформация на изходните измерени данни или след начална степенна Йео-Джонсън трансформация. Моделите, построени след степенна трансформация показват най-добри статистически индекси, като достигат до 90% коефициент на детерминация и показват много добри предсказващи и прогнозиращи

качества. Направен е и анализ на прогнозната способност на моделите при различни хоризонти на прогноза – от 24, 48 и 72 часа. В частност бе установено, че съществено влияние върху концентрациите на замърсителите показват 3 до 4 метеорологични фактора – температура на въздуха, скорост на вятъра, налягане и влажност на въздуха.

Глава 7. Приложение на GPS регуляризираща регресия с интелигентни предсказващи техники за моделиране на зависимости

В тази глава се прилага един от най-новите регресионни методи - GPS, съчетан с интелигентни техники за извличане на знания от данни с машинно обучение (data mining).

7.1. Моделиране на изходната лазерна генерация на лазер с пари на меден бромид с помощта на обобщена регуляризираща регресия GPS и предсказващи техники [D16]

С помощта на метода GPS и асоциираните с него техники TreeNet, RuleLearner и ISLE са обработени експериментални данни за лазер с пари на меден бромид. Построени и анализирани са клас модели за изследване влиянието на 10 лазерни работни параметри върху изходната мощност на лазера със и без асоциираните предсказващи техники. Моделите са сравнени с тези от линейна стъпкова регресия.

7.2. Повишаване на предсказващата способност на GPS моделите чрез трансформация на зависимата променлива Pout на лазер с пари на меден бромид

В този параграф се продължават изследванията от 7.1. В частност е проведено поподробно емпирично изследване на влиянието на разпределението на данните върху качеството на моделите с използване на начални трансформации на данните, които подобряват типа на разпределението към нормалното. Получени са GPS модели с много добри предсказващи качества. Моделите са приложени за предсказване и оценка на изходната мощност на бъдещи лазерни устройства.

7.3. Моделиране на концентрацията на ФПЧ10 за град Шумен с GPS регресия и предсказващи техники [D14]

Разглежда се задачата от параграф 6.2 за моделиране на данните на ФПЧ10 на град Шумен в зависимост от 6 метеорологични променливи. В този параграф задачата се решава с прилагане на обобщената претърсваща регуляризираща регресия GPS, в комбинация с техниките TreeNet, ISLE и RuleLearner. Получени са 7 модела, като коефициентите на детерминация на най-добрите модели достигат до 95-96% за обучителните и до 90% за тестовите извадки. Моделите са приложени както за предсказване на данните, така и за прогнозиране на бъдещи замърсявания в краткосрочен период от 96 часа. Проведено е сравнение на най-добрия GPS/RL_RP модел с по-рано получения модел SARIMA в параграф 6.2 за същите данни. Може да се заключи, че GPS моделът показва незначително по-добри резултати в прогнозите, като в същото време е по-лесен и по-бръз в сравнение с най-добрия SARIMA модел.

7.4. Приложение на метода на главните компоненти и GPS за изследване на чистотата на въздуха и моделиране на нивото на въглероден оксид за град Димитровград [D18]

Целта на този параграф е да се проучи замърсяването от 9 замърсители на въздуха в град Димитровград за период от 5 години и 2 месеца, въз основа на почасови данни. Прилага се МГК (PCA), за да се открият зависимости в общото замърсяване и приноса на всеки от 9-те замърсители. Вторият изследван проблем е намирането на зависимостта на въглеродния оксид от останалите замърсители и 6 метеорологични параметри. Независимо че концентрациите на въглеродният оксид в Димитровград не показват големи превишавания на установените национални и европейски норми, то се наблюдава един постоянен фон, който с течение на времето причинява много вредни за човешкото здраве последици. За провеждане на изследването е приложен GPS методът, комбиниран с интелигентните предсказващи техники. Получени са модели с 90% коефициент на детерминация и много добро съвпадение с данните. Моделите са приложени и за прогнозиране на нови концентрации на CO за 96 часов период.

Град Димитровград е основен индустриален център в югоизточната част на България с множество предприятия, чието производство се съпътства с извеждане на различни отпадъчни газове и вещества в атмосферата на града. Основни замърсители на въздуха на Димитровград са азотните оксиди и техните производни NOx, NO2, NO, както и други вредни газове – CO, NH3, H2S, фините прахови частици PM10, приземния озон и др. От тези замърсители недостатъчно внимание се отделя на емисиите на въглероден оксид, който се поддържа в постоянен фон и въпреки неголямата концентрация запазва нивата си през последните 10 години. Въглеродният оксид е от най-общия тип отровни газове в атмосферата [5, 6, 8]. Образува се при непълно изгаряне на карбон в горива, основно в различни горива от индустриални процеси, автомобилни горива и др. Хроничното излагане на относително ниски нива на въглероден окис може да причини постоянно главоболие, замаяност, да доведе до устойчиви състояния на депресия, объркване, загуба на паметта, гадене и повръщане [211]. Трябва да отбележим специално, че по данни на ЕЕА и световната здравна организация, благодарение на предприетите мерки за поддържане на чистотата на въздуха, средното състояние е, че индикаторите за СО дневната и 8-часова максимална концентрация са намалели с около една трета в ЕС през последното десетилетие. Тези намаления в концентрации са в съответствие с намалението на общите емисии на замърсяване [73, 8, 310]. За съжаление, това не е валидно за град Димитровград и остава като сериозен проблем.

Целта на този параграф е провеждането на статистическо изследване на временните редове за емисиите на 9 замърсители на въздуха на град Димитровград, в това число: NOx, NO, SO2, CO, PM10, NO2, O3, H2S, NH3. Използват се почасови данни за над 5-годишен период. Специално изследване е направено и за оценка на асоциативната връзка (с корелационен анализ) на наблюдаваните емисии на въглеродния оксид с останалите замърсители и 8 метеорологични променливи.

Конкретните цели на изследването са:

- 1) Откриване на шаблони в общото замърсяване и приносът в него на всеки от изследваните основни 9 замърсителя чрез прилагане на РСА;
- 2) Прилагане на GPS регресията за построяване на модели на CO (въглероден оксид) в зависимост от нивата на концентрациите на останалите замърсители и 8 метеорологични променливи;
- 3) Прилагане на GPS за предсказване и прогнозиране на CO за 96-часов период напред във времето;
- 4) Оценка на точността на моделното приближение и на получените прогнози.

Изследването е проведено с помощта на софтуерните пакети SPSS и Salford Predictive Modeler.

• Описание на данните

Изследваните данни са временни редове на следните 9 основни замърсители на въздуха на град Димитровград: СО - въглероден оксид; РМ10 (ФПЧ10) - фини прахови частици под 10 микрона; SO2 - серен диоксид; NO2 - азотен диоксид; NO - азотен оксид; NOx - азотни оксиди; O3 - приземен озон; H2S – сероводород; NH3 - амоняк.

Използвани са и 8 метеорологични променливи: PRESS - атмосферно налягане; GWD - обобщена посока на вятъра по сектори; WD - посока на вятъра по сектори; TEMP -

температура на приземния въздух; GSR - слънцегреене; UMR - относителна влажност на въздуха; WS - скорост на вятъра; SIGMA - посока на вятъра.

Данните са за период от малко над 5 години – от 1 януари 2009 година до 28 февруари 2014 година. Общ обем на извадката – от 45408 до 45311 наблюдения, в часове.

На Фиг. 7.11 е дадена графика на временния ред за СО. Веднага може да се заключи, че редът е стационарен и няма детерминистичен тренд.

• 7.4.2. Анализ на разпределението на данните с робастни методи

При първоначално изследване на данните от временните редове на замърсителите се установиха множество резки скокове, което се среща често в данните за околната среда. Както е добре известно, за такъв тип данни стандартните мерки като средна стойност, стандартно отклонение, асиметрия и ексцес не винаги са подходящи индикатори за типа на разпределението им, тъй като са силно чувствителни към големи разлики в стойностите (отдалечените случаи). Обратно на това, робастните методи са по-стабилни и не са чувствителни към конкретния тип на разпределение на данните, тъй като не зависят от отделните наблюдения [279]. За проверка на допусканията за прилагане на статистически методи като корелационен и регресионен анализ в този параграф ще използваме робастни мерки за оценка на средните стойности, асиметрията и ексцеса. По-специално, медианата се използва вместо средна стойност. Като алтернатива на коефициентите на асиметрия и ексцес в Табл. 7.10 са пресметнати техните робастни и устойчиви алтернативи – индекс на Юл-Кендал (γ_{YK}) и коефициента на ексцес на Мурс. Индексът на Юл-Кендал, предложен найнапред от Боули [36, 147, 279], е широко използвана робастна мярка за симетрия, базирана на квартилите на извадката:

$$\gamma_{YK} = (q_{0.25} - 2q_{0.5} + q_{0.75}) / (q_{0.75} - q_{0.25}). \tag{7.18}$$

Този индекс по абсолютна стойност е по-малък от 1. Счита се, че при $-0.25 \le \gamma_{YK} \le 0.25$ разпределението е симетрично, при $-0.50 \le \gamma_{YK} \le 0.75$ е почти симетрично, а в останалите случаи – не е симетрично [147]. Като робастна алтернатива на ексцеса бе използван централният коефициент на Мурс, зададен със следната формула [147]:

$$KR = \left[(E_7 - E_5) - (E_3 - E_1) \right] / \left(E_6 - E_2 \right) - 1.23, \tag{7.19}$$

където E_i е *i*-ти октил. За случая на нормално стандартно разпределение имаме KR = 0.

От изследване на описателната статистика се вижда, че всички медиани са по-малки от средните, а индексите на Юл-Кендал γ_{YK} са положителни, т.е. преобладават по-ниските стойности от средните. Освен това сравнително неголемите стойности на Юл-Кендал индексите означават, че разпределенията на данните за O3, NO2, H2S, NH3 могат да се считат за симетрични, тези на PM10 и CO – за много близки до симетрични, а за случая на NO и SO2 – близки до симетрични. Стойностите на коефициентите на ексцес на Мурс са относително неголеми за всички променливи, с изключение на NO. Като цяло можем да заключим, че разпределенията са близки по характер до нормално разпределение, на база на робастните мерки (7.18)-(7.19).



Фиг. 7.11. Наблюдавани стойности на концентрацията на въглероден оксид (*CO*) на град Димитровград в над 5-годишен период (почасови данни).

От гледна точка на здравните изисквания [8], в данните се наблюдават скокове с големи превишавания на почти всички замърсители и то неспорадични. Това се отнася особено за азотните оксиди и PM10.

По-специално данните за СО от Фиг. 7.11 показват, че периодично се наблюдават пикове през зимния период на годината. Макар че средната стойност от 0.496 mg/m³ и медиана 0.282 mg/m³ не превишават предписаните официални лимити, наблюдава се ясна тенденция на запазване на нивото на концентрация като непрекъснато съществуващ фон на замърсяване с СО през годините, което поставя жителите на града във вредна атмосферна среда на приземния въздух.

Следва да се отбележи и наличието на много високи системни пикови превишавания за озона O3, SO2 и PM10. Трябва да се обърне внимание и на високата средна стойност на PM10 от 55.46 µg/m³ и медиана съответно 39.30 µg/m³. Предписаните от Световната здравна организация WHO за PM10 са съответно: до 20 µg/m³ годишно и до 50 µg/m³ дневно [8].

• Изследване на замърсителите на въздуха с помощта на метода на главните компоненти

Първата цел е изследване на нивото на асоциация между всички замърсители на базата на наблюдаваните данни за целия период. На Табл. 7.11 е показана частта на корелационната матрица с получените корелационни коефициенти. От Табл. 7.11 виждаме, че около 1/3 от корелационните коефициенти ca над 0.5. т.е. в данните съществува силна мултиколинеарност. Последното съответствие e в с химичната природа на взаимодействията, протичащи в атмосферния въздух и определяни от източниците на замърсяване, както и от динамиката на метеорологичните променливи. Най-високи са коефициентите на корелацията между променливите на NOx и NO (0.954) и променливите NOx и NO2 (0.813). Това е очаквано, поради близките им химически свойства и общи източници на замърсяване.

От останалите променливи се откроява CO, показващо средна до висока корелация с NOx, NO, NO2, H2S, PM10 и ниска и слаба корелация с останалите 3 замърсителя. Това индикира, че има силни линейни асоциации между тези променливи, съответно между техните източници. Идеята е да се установят видът и силата на тези взаимодействия. На базата на

налични данни е интересно да се изследва и зависимостта на СО от всички останали 8 замърсители. Подобен подход е направен в [260] за нива на замърсяване на NOx и PM10.

Всички корелационни коефициенти от Табл. 7.11 са положителни, с изключение на този на озона (-0.319), който както е известно е вторичен замърсител и се получава като резултат от химични реакции между останалите основни замърсители във въздуха. Преодоляването на проблема с мултиколинеарността може да се постигне чрез преобразуване на променливите към некорелиращи с използване на метода РСА.

r r				-r			- r · 🦳	r r ·	· _ ·
Замърсител	03	NOx	NO	NO2	SO2	H2S	NH3	PM10	CO
O3 ($\mu g/m^{3}$)	1								
NOx (ppb)	-0.399	1							
NO ($\mu g/m^3$)	-0.303	0.954	1						
NO2 ($\mu g/m^3$)	-0.477	0.813	0.602	1					
SO2 ($\mu g/m^3$)	0.042	0.221	0.164	0.271	1				
H2S ($\mu g/m^3$)	-0.264	0.570	0.557	0.439	0.177	1			
NH3 (µg/m ³)	-0.133	0.441	0.365	0.468	0.093	0.264	1		
PM10 (µg/m ³)	-0.295	0.640	0.567	0.606	0.257	0.482	0.350	1	
$CO (mg/m^3)$	-0.318	0.722	0.699	0.568	0.243	0.521	0.298	0.632	1

Табл. 7.11. Корелационна матрица на 9 замърсители на въздуха на гр. Димитровград^{а)}.

^{а)} Детерминанта = 2.086Е-6. Всички корелационни коефициенти са значими със Sig. =0.000.

• Приложение на МГК (РСА)

За прилагане на PCA и изследователски факторен анализ освен мултиколнеарността, бе изследвана и адекватността на данните. За целта с помощта на SPSS бе установено, че KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) мярката за адекватност на извадката е равна на 0.712>0.5 и Бартлет тестът за сферичност има статистическа значимост 0.000. Всички променливи са предварително стандартизирани към z-scores.

Бе проведено извличане на главните компоненти (PCs) чрез PCA. Получен бе компонент PC9 като пренебрежимо малък така, че на практика 100% от дисперсията се обясняват от 8 PCs. На следващия етап от приложение на PCA метод бе проведено въртене на 8-те компоненти със 7 метода. Въртенето по метода Promax даде най-добре разграничени (обособени) един от друг главни компоненти PCs. Получените тегла след завъртането и разпределението по 8 главни компоненти, съответни на първоначалните изследвани променливи е показано на Табл. 7.13.

От Табл. 7.13 се вижда че променливите NO и NOx са обединени в общ фактор (главен компонент PC1) след въртенето на компонентите. Теглата им са съответно 1.089 и 0.792. Всички останали променливи са ясно разграничени една от друга, с преобладаващи тегла над 0.95 (по главния диагонал). Теглата на другите променливи за всяко PC са много малки (под 0.05 по абсолютна стойност), като допустимата граница за извадката е 0.3.

Съгласно Табл. 7.13, получихме следното съответствие между главните компоненти и замърсителите:

PC5=[SO2], PC6=[PM10], PC7=[NO2], PC8=[CO]. (7.20)

Проверено бе, че те са линейно некорелиращи чрез изчисляване на инфлационния фактор на дисперсия VIF, който е по-малък от 1, при изискване да е по-малък от 10.

В последната колона на Табл. 7.13 са дадени завъртените суми на квадратите от теглата в дисперсиите (Rotation Sums of Squared Loadings). Тези стойности показват преразпределението на дисперсията след въртенето на компонентите и преобразуването им в некорелиращи променливи. Освен това да припомним, че те са стандартизирани още в началото на анализа. След въртенето относителната тежест на получените PCs в разпределението на общата дисперсия показва, че най-съществен относителен принос за общото замърсяване на въздуха имат азотните оксиди (NO, NOx, NO2), следвани от СО и PM10. Тези стойности показват, че най-значителен дял в общото замърсяване на въздуха в Димитровград за изследвания 5-годишен период имат съответно: NO и NOx (с общо тегло 3.905), NO2 (3.409), следвани от СО (3.109) и PM10 (2.950).

			Пром	лакс мет	од ", ".				
			ΓJ	тавен ко	мпонен	Г			Rotation
Промоницира									Sums of
променлива	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	Squared
									Loadings
NO ($\mu g/m^3$)	1.089								2 005
NOx (ppb)	0.792								3.905
O3 ($\mu g/m^{3}$)	-0.001	0.999							1.750
NH3 (mg/m ³)	0.001	0.000	0.999						1.846
H2S (mg/m^3)	0.010	0.000	0.000	0.993					2.467
SO2 ($\mu g/m^3$)	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000				1.315
PM10 ($\mu g/m^3$)	0.011	0.000	0.001	0.002	0.000	0.987			2.950
NO2 ($\mu g/m^3$)	-0.003	-0.006	0.004	0.001	0.000	0.006	0.993		3.409
$CO (mg/m^3)$	0.049	0.000	0.000	0.003	0.000	0.008	0.002	0.959	3.109

Табл. 7.13. Моделна завъртяна матрица, получена при въртене на главните компоненти с Промакс метод ^{a), b)}.

^{а)} Метод на извличане на с.ст.: Principal Component Analysis.

^{b)} Метод на въртене: Promax с Кайзер нормализация.

• Моделиране на концентрациите на въглероден оксид с GPS регуляризираща регресия

Както бе посочено в началото на параграф 7.4, независимо от невисоките нива на СО, този замърсител остава доста вреден и опасен за здравето и не трябва да се пренебрегва. В същото време корелационната матрица показа, че той е силно асоциативно свързан с останалите атмосферни замърсители. По тази причина се направи изследване на зависимостта му чрез метода GPS с използване на PCs трансформации на променливите.

Методът GPS се приложи съчетан с интелигентни методи за машинно обучение, с кросвалидация, комбиниран с TreeNet, с коефициенти на еластичност съответно: Compact(0,0), Lasso(1,0), Ridged Lasso (1,1), Ridged(2,0).

Общият вид на GPS модела е подобен на класическа линейна многомерна регресия:

$$\hat{y}(X_1, X_2, ..., X_p) = a_0 + a_1 X_1 + ... + a_p X_p$$
(7.21)

Като резултат от комбинацията на методи, в уравнение (7.21) участват голям брой предиктори $(X_1, X_2, ..., X_p)$, сред които въведените начални предиктори (по избор), както и генерираните от TreeNet фиктивни предиктори [108, 218].

За конструиране на моделите на променливата [CO] (получена след PCA и означена с квадратни скоби от фактор PC8), бе проведен нов PCA с останалите 8 променливи, които се преобразуваха в 7 групирани независими променливи, отново наречени PCs. За създаване на GPS модели, като предиктори, наричани по-нататък Raw predictors, бяха използвани тези 7 PCs, началните метеорологични променливи, както и стандартните променливи за дефиниране на времето – Day_Hours, Day, и Hour. Основните статистики на резултатните на най-добри модели с използване на предсказващата техника GPS, в комбинация с техниките

за машинно обучение TreeNet, ISLE и RuleLearner са показани на Табл. 7.14. Методът TreeNet генерира множество от допълнителни предиктори на базата на мрежа от малки класификационни дървета с до 6 крайни възли. Методът ISLE осъществява компресия за редуциране на повтарящи се дървета. Техниката RuleLearner е оптимизатор на крайни модел. Описание на техниките е дадено в параграф 7.1.

			Димитро	овград").				
		Обуч.	Обуч.	%	Тест	Тест	%	Еласти
	Модел	R^2	N	комп	R^2	N	комп	чност
			коеф.	ресия		коеф.	ресия	
1	Original TreeNet	0.86197	192	0.00%	0.86024	200	0,0%	-
2	ISLE	0.89146	167	13%	0.89148	167	16%	(1.1)
3	RuleLearner	0.84091	154	92%	0.84474	154	92%	(1.0)
4	ISLE_RawPredictors	0.89535	220	-15%	0.89290	220	-10%	(1.1)
5	RuleLearner_RawP	0.90158	429	78%	0.89693	429	79%	(1.1)
	redictors							
6	ISLE_RuleLearner	0.84062	153	92%	0.84426	153	92%	(1.0)
7	ISLE_RuleLearner_R	0.90156	359	81%	0.89602	359	82%	(1.1)
	awPredictors							

Табл. 7.14. Статистики на получените най-добри GPS модели на [CO] за град

^{а)} Еластичност (1.1) съответства на Ridged Lasso, а (1.0) съответства на Lasso метод.

При генериране на моделите бе поставен лимит (като контролен параметър) до 200 на брой дървета (или до 200 фиктивни предиктора). В процеса на машинно обучение е използвана 10-разделна кросвалидация, т.е. обучителната случайна извадка (Learn) се базира на 90% случаи от данни, а останалите 10% се използват за тестова извадка (Test). Предсказаните от модела стойности (Test) са сравнени с наблюдаваните значения на [CO]. Процедурата на моделиране за всеки един модел се извършва за 10 непресичащи се множества на тестови извадки. Този подход предпазва от преопределяне на модела.

Ще отбележим, че освен представените в Табл. 7.14, бяха получени и изследвани класове от близки модели, като за прецизен избор на най-добър модел се приложиха критериите от Табл. 7.14 и Табл. 7.15. Както се вижда от Табл. 7.14, с най-добри статистически показатели е модел 5, от тип **RuleLearner_RawPredictors**. За него в случая коефициентът на детерминация R^2 е най-висок, като R^2 =90% както за обучителната, така и за тестовата извадки. Много близък по показатели до модел 5 е модел 7, а също така и модели 4 и 2, като последният има само N=167 коефициента. Той обаче отстъпва в качеството на прогнозите.

В Табл. 7.15 са дадени някои от получените оценки за грешките на избрания за най-добър модел **RuleLearner_RawPredictors**, който показва много добро предсказване за тестовата и обучителната извадка, с относителна грешка между тях от 5-6%.

Табл. 7.15. Грешки на избрания GPS модел RuleLearner_Raw Predictors на [CO] на Лимитровград

	лад.	димитровтрад.					
Вид грешка	Обуч.	Тест	Отн. грешка				
RMSE (Root Mean Square Error)	0.217	0.228	0.051				
MAD (Mean Absolute Deviation)	0.112	0.118	0.054				
MRAD (Mean Relative Absolute Deviation)	5.813	6.160	0.060				

Поради сложността на избрания модел 5, съдържащ N=429 коефициента, не се привежда тук. Относителното влияние на отделните предиктори в модела спрямо предиктора с най-голям принос, за който значението е 100% е дадено на Табл. 7.16.

модела Кателеатног	
Променлива	Относителен принос, %
DAY_HOURS	100
PC1, [NO, NOx]	59.7
PC6, [PM10]	56.3
DAY	40.4
TEMP	29.8
PC5, [SO2]	21.4
PC3, [NH3]	21.2
PC7, [NO2]	17.2
PC4, [H2S]	15.8
HOUR	15.0

Табл. 7.16. Принос на променливите към модела RuleLearner Raw Predictors на [CO].

Поради сложността на избрания модел 5, съдържащ N=429 коефициента, не се привежда тук. Относителното влияние на отделните предиктори в модела спрямо предиктора с найголям принос, за който значението е 100% е дадено на Табл. 7.16.

От Табл. 7.16 се вижда, че освен времевите променливи, влияние в модела, описващ [CO] имат седемте PCs, в намаляващ ред съответно: PC1 (NO и NOx), PC6 (PM10), PC5 (SO2), PC3 (NH3), PC7 (NO2), PC4 (H2S), PC2 (O3). Влиянието на основните метеорологични променливи в намаляващ ред е: TEMP (температура на въздуха)-30 единици, WS (скорост на вятъра) – 14 единици и PRESS (налягане) – 12 единици, а останалите са с влияние под 10% единици.

Следва да обясним и влиянието на времевите променливи. Те отразяват зависимостта от времето, по подобие на едномерните модели на временни редове, в които времето е единствената независима променлива. В нашия случай, естествено подредбата на наблюденията има съществено влияние в модела, като DAY_HOURS има 100 единици. Тази променлива в GPS е от непрекъснат тип (десетична дроб). Последното може да се тълкува, че имаме цикличност от 24 часа. Това напълно съответства на другите типове модели, получени в Глава 6. Също така, сравнително голямо влияние има променливата DAY - с 40 единици и променливата HOUR – с 15 единици. Първото означава, че за всяко текущо значение във временния ред (концентрация на въглероден окис) моделът отчита зависимост от стойност отпреди 1 ден, а второто означава, че се отчита и по-слаба зависимост спрямо предишни часове. Това може да се интерпретира като моделиране на авторегресията и сезонността на реда.

• Приложение на GPS/RL RP модела за прогнозиране на [CO]

Като пример привеждаме резултатите от приложението на получения GPS/RL_RP модел за краткосрочно прогнозиране с 96 часа напред на концентрациите на въглероден оксид. Това е възможно, тъй като тези данни досега не бяха използвани в моделирането и бяха запазени за прогнозиране и оценка на предсказващата способност на моделите. За целта бяха добавени запазените данни за метеорологичните променливи и изчислени значенията на 7-те PCs към основните данни за следващите 96 часа, необходими като предиктори. С това размерът на извадките достига до N = 45408 времеви точки.

Резултатите от измерените данни и прогнозираните с модела за 96 часа извън моделната извадка са показани на Фиг. 7.12.



Фиг. 7.12. Сравнение на известни наблюдавани данни на *CO* за град Димитровград, невключени в процеса на моделирането и прогнозните резултати за тях, изчислени с модела GPS/RL_RP за 96 часа напред във времето.

Наблюдава се като цяло много добро съответствие. От Фиг. 7.12 може да се заключи, че избраният модел има сравнително много добри прогнозиращи качества. При скокове на нивата на СО в рамките на 8 и повече последователни часа, те са предсказани добре от модела. Много високите скокове с кратки периоди под 8 последователни часа не са предсказани добре. Това показва, че при необходимост следва да се поставят по-високи лимити при задаване на контролните параметри на модела от изследователя, напр. максимален брой до 500 или 2000 дървета за TreeNet модела, по-голям процент на кросвалидация и др., за да се подобри началното класифициране.

Изводи към Глава 7

7.1. Построени са и са изследвани класове от модели на изходната лазерна мощност на CuBr лазер с помощта на метода GPS със и без асоциираните с него data mining техники TreeNet, RuleLearner и ISLE. Данните са за независими 10 променливи, от извадка с обем n=387. Получените регресионни GPS модели имат коефициент на детерминация R²=98% за обучителната извадка и 97% за тестовата извадка. Установено е, че моделите нямат достатъчно добро качество при предсказване на високите стойности на зависимата променлива.

7.2. Проведено е изследване на влиянието на разпределението на данните върху качеството на моделите с използване на начални трансформации на данните, които подобряват типа на разпределението към нормалното. Установено е, че с този подход качеството на моделите за разглежданите данни се повишава в рамките до 5-6%. Същественото подобрение е в областта на високите стойности на изходната лазерна мощност, където предсказването се подобрява с 10-15%, така че моделът има достатъчно добри предсказващи свойства, в рамките на 5% грешка от измервания. Моделите са приложени за предсказване на бъдещи експерименти, което показа възможност за увеличаване на изходната мощност на лазерното устройство с до 15%.

7.3. Построени и анализирани са модели на данните на ФПЧ10 на град Шумен в зависимост от 6 метеорологични променливи с прилагане на обобщената претърсваща регуляризираща регресия GPS в комбинация с интелигентните предсказващи техники TreeNet, ISLE и RuleLearner. Получени са 7 модела с най-добри качества, с коефициенти на детерминация до 95-96% за обучителните и до 90% за тестовите извадки. Моделите са приложени за предсказване на данните и за прогнозиране на бъдещи замърсявания в краткосрочен период от 96 часа.

7.4. Проведено е сравнение на най-добрия GPS/RL_RP модел с по-рано получения модел SARIMA в параграф 6.2 за същите данни. Може да се заключи, че GPS моделът показва незначително по-добри резултати в прогнозите, като в същото време е по-лесен и по-бръз в сравнение с най-добрия SARIMA модел.

7.5. Получен е факторен модел за 9 замърсителя на въздуха на град Димитровград, групирани в 8 главни некорелиращи компонента (PCs). На тази база е установено, че найсъществен принос в общото замърсяване на въздуха на град Димитровград имат азотните оксиди (NO, NOx, NO2), следвани от СО и РМ10. Замърсявания от този род се дължат основно на азотноторовия завод и няколко други големи производствени мощности в града, както и на използването на твърди горива в бита.

7.6. Получено е регресионно уравнение на замърсителя въглероден оксид (СО) на град Димитровград с помощта на GPS и интелигентните предсказващи техники. Изходни предиктори са 7 главни компонента и 6 метеорологични реда, изследвани в период от 5 години и 2 месеца. Получено е високо качество на модела с 90% съвпадение с наблюдаваните реални данни. Установено е, че основно влияние в модела имат NO, NOx, PM10, температурата на въздуха. Моделите са приложени за изготвяне на 96 часова прогноза напред във времето, сравнени с реалните измервания, с много добро съответствие.

7.7. Всички модели са оценени с кросвалидация с машинно обучение.

7.8. Прилагането на новата GPS регуляризираща регресия е подходящ инструмент за моделиране на временни редове в областта на науките за околната среда и може да се прилага за предсказване и прогнози, с цел подобряване на контрола и предотвратяване на замърсявания на атмосферния въздух в градски райони.

Заключение

Представените изследвания и изводи позволяват да се заключи, че целта и задачите на дисертационния труд са постигнати. Основната част от получените резултати е публикувана в 19 научни публикации. Изнесени са 17 доклада на научни форуми и семинари.

Научни и научно-приложни приноси, защитавани от автора

- 1. Развити и анализирани са клас нови аналитични модели за определяне на радиалния температурен профил на два типа лазери с метални пари: лазер с пари на меден бромид (CuBr) и лазер с пари на стронциев бромид (SrBr2). Моделите са приложени за реални лазери и е установено много добро съответствие с експеримента.
- 2. Развити са хибридни аналитично-числени двумерни модели за определяне на основни характеристики на високочестотен разряд в хелий и аргон и изследване на прехода от слаботокова към силнотокова форма на разряда. Установено е добро съгласуване на числените резултати с експериментални данни и едномерни модели.
- 3. Получени са два нови модифицирани нелинейни аналитични критерия за апроксимиране на кривата на пробива във високочестотен аргонов разряд при ниски налягания в комбинирани полета. Установено е много добро съответствие с експериментални резултати и подобрено предсказване спрямо резултати на други автори.
- 4. Построени са факторни, клъстерни и регресионни модели за изследване на зависимости между изходната лазерна мощност и голям брой входни лазерни параметри на CuBr и УВ лазери. Моделите са приложени за предсказване на изходната мощност на съществуващи и бъдещи лазери и насочване на експеримента.
- 5. Построени са факторни, клъстерни и регресионни модели за изследване на зависимостта между времето на живот на УВ лазер и голям брой входни лазерни параметри.
- 6. Получени са и са анализирани класове от МАРС модели във вид на базисни функции и моделни уравнения, описващи явни зависимости между изходната лазерна мощност на CuBr, УВ и SrBr2 лазери и голям брой входни лазерни параметри. Показано е, че моделите отчитат локални нелинейни зависимости в многомерни подобласти. Моделите са приложени за предсказване на изходната лазерна мощност за съществуващи и бъдещи лазерни устройства.
- 7. Получени и анализирани са МАРС модели от уравнения на зависимостта на времето на живот на УВ лазерите от голям брой входни лазерни параметри. Моделите се валидират с кросвалидация за машинно обучение.
- 8. Получени са регресионни CART модели във вид на разрешаващо дърво и класификационни правила за изходната лазерна мощност на CuBr лазер и голям брой входни лазерни параметри, валидирани с машинно обучение. Установени са правилата и най-съществените променливи за получаване на най-високите стойности на изходната лазерна мощност. Моделът е приложим за обясняване и насочване на експеримента, и в частност на експеримент.

- 9. Получен е клас линейни регресионни уравнения на изходната мощност на CuBr лазер с помощта на новата обобщена претърсваща регуляризираща регресия (GPS) и асоциираните с нея интелигентни предсказващи техники TreeNet, ISLE, RuleLearner. Получено е подобрение на предсказването с 10-15% в областта на най-високите стойности на изходната лазерна мощност в резултат от проведено емпирично изследване на влиянието на типа на разпределението върху качествата на GPS моделите. Получените модели са приложени за предсказване и прогнозиране на експеримента.
- 10. Изследвани и анализирани са временни редове за 6 замърсителя на атмосферния въздух на град Благоевград. С прилагане на факторен анализ замърсителите са класифицирани в три групи, обясняващи комбинирани общи източници на замърсяване. За всеки от замърсителите са получени и анализирани едномерни стохастични SARIMA модели с високо качество. Моделите са приложени за краткосрочни прогнози.
- 11. Получени са стохастични SARIMA модели с трансферни функции за моделиране на въздушни замърсители на градовете Шумен, Кърджали и Димитровград в зависимост от метеорологичните променливи. Моделите са приложени за краткосрочни прогнози.
- 12. Получени и анализирани са регресионни GPS модели на проблемни замърсители на въздуха в градовете Шумен и Димитровград в зависимост от метеорологичните редове. Моделите са приложени за предсказване и краткосрочни прогнози.

<u>№</u> §	Научни публикации (в хронологичен ред)	IF/ SJR
D1 3.1	Илиев И. П., Гочева С. Г., Числено определяне на интензивността на електрическото поле във високочестотен хелиев разряд, Е+Е, Съюз по електроника, електротехника и съобщения, София, том 10-12, стр. 16-19, 2003. ISSN 0861-4717	
D2 3.3	Iliev I., Gocheva S., Sabotinov N., On the stability of radio-frequency discharge, <i>Proceedings of SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineering)</i> , Bellingham, WA, USA, Vol. 5449, pp. 131-135, 2004. ISSN: 1996756X <u>http://dx.doi.org/10.1117/12.563118</u>	/SJR 0.236
D3 3.2	Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Semerdzhiev H. I., Computer modeling of characteristics of heavy current radio-frequency argon discharge, <i>Proceedings of XL Int. Scient. Conf. on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2005</i> , vol. 2, Serbia and Montenegro, Niš, June 29 – July 1, pp. 705-708, 2005. Ed. B. D. Milovanović, Published by: Faculty of Electronic Engineering, Niš, Serbia and Montenegro. ISBN: 86-85195-25-X http://www.icestconf.org/wp-content/uploads/2016/proceedings/icest_2005.pdf	
D4 2.2	Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Temperature profile of the impulse discharge, <i>Proceedings of ICEST 2007</i> , 24-27 June, 2007, Ohrid, Macedonia, vol. 2, pp. 769-772, 2007. Ed. C. Mitrovski, Faculty of Technical Sciences, Bitola, Macedonia. ISBN: 9989-786-06-2. <u>http://www.icestconf.org/wp-content/uploads/2016/proceedings/icest_2007_02.pdf</u>	

Списък на публикациите по темата на дисертационния труд

D5 4.1	Iliev I. P., S. G. Gocheva-Ilieva, N. V. Sabotinov, Prognosis of the Copper Bromide Laser Generation through Statistical Methods, in: XVII Intern. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers 2008, September 15-19, Lisbon, Portugal, eds. R. Vidal et al., <i>Proceedings of SPIE</i> , 7131/ <i>Novel Approaches</i> . SPIE, Bellingham, WA, vol. 71311, J1-J8, 2009. ISSN 0277-786X, ISBN 97808194 <u>http://dx.doi.org/10.1117/12.816738</u>	/SJR 0.218
D6 4.3	Gocheva-Ilieva S. G., Iliev I. P., Temelkov K. A., Vuchkov N. K., Sabotinov N. V., Classifying the basic parameters of ultraviolet Copper Bromide laser, <i>AMiTaNS 2009</i> , Sozopol, 22-27 June 2009, <i>AIP Conference Proceedings</i> , eds. M.D.Todorov and C.I.Christov, Melville NY: American Institute of Physics, CP 1186, pp. 413-420, 2009. ISBN: 978-0-7354-0752-7. http://dx.doi.org/10.1063/1.3265356	/SJR 0.141
D7 5.1	Gocheva-Ilieva S. G., Application of MARS for the construction of nonparametric models, (invited talk), <i>Proceedings of the 39th Spring</i> <i>Conference of the Union of Bulgarian Mathematicians</i> , Albena, April 6-10, 2010, ed. Peter Russev, pp. 29-38, 2010. ISSN1313-3330. <u>http://www.math.bas.bg/smb/2010_PK/tom/pdf/029-038.pdf</u>	
D8 2.3	Gocheva-Ilieva S. G., Mathematical modelling and simulation of radial temperature profile of strontium bromide lasers, (invited talk). <i>Proc. of Int. Sci. Conf., REMIA</i> '2010, 10-12.12.2010, Plovdiv, pp. 21-30, 2010. ISBN: 978-954-423-621-2. <u>http://sci-gems.math.bas.bg/jspui/bitstream/10525/1468/1/s0%20%2003.%20Gocheva.pdf</u>	
D9 5.2	Gocheva-Ilieva S. G., Voynikova D. S., Iliev I. P., Modeling of output characteristics of a UV Cu+ Ne-CuBr laser, <i>Mathematical Problems in</i> <i>Engineering</i> , vol. 2012, pp. 1-21, Article ID 420782, 2012. ISSN 1024-123X <u>http://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/420782/</u>	IF 1.383
D10 5.3	Iliev I. P., Voynikova D. S., Gocheva-Ilieva S. G., Simulation of the output power of copper bromide lasers by the MARS method, <i>Quantum Electronics</i> , 42(4) pp. 298-303, 2012. ISSN: 1063-7818. <u>http://iopscience.iop.org/1063-7818/42/4/A03</u>	IF 0.823
D11 5.4	Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Modeling and simulation of output power of a high-power He–SrBr2 laser by using multivariate adaptive regression splines, <i>Optics & Laser Technology</i> , 45(1) pp. 461-468, 2013. ISSN: 0030-3992 <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.009</u>	IF 1.649
D12 5.5	Iliev I. P., Voynikova D. S., Gocheva-Ilieva S. G., Application of the classification and regression trees for modeling the laser output power of a copper bromide vapor laser, <i>Mathematical Problems in Engineering</i> , vol. 2013, Article ID: 654845, 2013. ISSN 1024-123X. http://www.hindawi.com/journals/mpe/aip/654845/	IF 1.082
D13 4.3	Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Study of UV Cu + Ne – CuBr laser lifetime by statistical methods, <i>Quantum Electronics</i> , 43(11), 1014–1018, 2013. ISSN: 1063-7818. http://dx.doi.org/10.1070/OE2013v043n11ABEH015125	IF 0.886

D14 6.2 7.3	Ivanov A. V, Gocheva-Ilieva S. G., Short-Time Particulate Matter PM10 Forecasts Using Predictive Modeling Techniques, <i>Proc. of Fifth Conference of</i> <i>the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in</i> <i>Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'2013)</i> , Albena, Bulgaria, June 24- 29, 2013. Ed. M. Todorov, <i>AIP Conf. Proc.</i> CP 1561, pp. 209-218, 2013. ISBN: 978-0-7354-1189-0. <u>http://dx.doi.org/10.1063/1.4827230</u>	/SJR 0.147
D15 6.1	Gocheva-Ilieva S. G., Ivanov A. V., Voynikova D. S., Boyadzhiev D. T., Time series Analysis and Forecasting for Air Pollution in Small Urban Area – an SARIMA and Factor Analysis Approach, <i>Stochastic Environmental Research</i> <i>and Risk Assessement</i> , Springer, 28 (4), pp. 1045-1060, 2014. ISSN: 1436-3240. DOI: 10.1007/s00477-013-0800-4 <u>http://link.springer.com/article/10.1007/s00477-013-0800-4</u>	IF/ 2.086
D16 7.1	Gocheva-Ilieva S. G., Application of the Generalized Pathseeker regularized regression (Invited talk), <i>Mathematics and Education in Mathematics</i> , vol. 2014, <i>Proc. 43th Spring Conference of the Union of Bulgarian Mathematicians</i> , 2-6 April 2014, Borovetz, pp. 34-43, 2014. ISSN1313-3330. http://www.math.bas.bg/smb/2014_PK/tom_2014/pdf/034-043.pdf	
D17 3.4	Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Analytic Model of the Breakdown of Argon at Low Pressure in Combined Electric Fields, <i>Proc. 2nd Intl' Conference on</i> <i>Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (ICAESAM2014)</i> , organized by International Institute of Engineers, May 4-5, 2014 Istanbul (Turkey), pp. 96-98, 2014. ISBN 978-93-82242-91-8. <u>http://iieng.org/siteadmin/upload/6525E0514066.pdf</u>	
D18 7.4	Ivanov A., Voynikova D., Gocheva-Ilieva S., Kulina H., Iliev I., Using principal component analysis and general path seeker regression for investigation of air pollution and CO modeling, AMITANS'2015, <i>AIP Conf. Proc.</i> 1684, ed. M. Todorov, 100004, pp. 1-11 (2015). ISBN: 978-0-7354-1331-3 http://dx.doi.org/10.1063/1.4934341	/SJR 0.152
D19 6.3	Voynikova D. S., Gocheva-Ilieva S. G., Ivanov A. V., Iliev I. P., Studying the effect of meteorological factors on the SO2 and PM10 pollution levels with refined versions of the SARIMA model, AMITANS'2015, <i>AIP Conf. Proc.</i> 1684, ed. M. Todorov, 100005, pp. 1-12 (2015). ISBN: 978-0-7354-1331-3 <u>http://dx.doi.org/10.1063/1.4934342</u>	/SJR 0.152

Общ брой научни публикации по темата на дисертационния труд: 19

- От тях брой статии в научни списания: **7**, от които брой статии в списания с Импакт фактор (ИФ, Thomson Reuters Impact Factor): **6.** Общ ИФ: **7.909**
- Брой статии в трудове на конференции: 12, от тях в трудове на конференции с импакт ранг (SCImago Journal Rank, Scopus): **6**

Апробация на резултатите

А) Доклади, изнесени на научни форуми и семинари

- 1. "On the stability of radio-frequency discharge". 8th Int. Conf. on Laser and Laser Information Technologies, sponsored by SPIE, Smolyan, Bulgaria, 1-3 September, 2003.
- 2. "Computer modeling of characteristics of heavy current radio-frequency argon discharge". XL Intern. Scient. Conf. on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2005, sponsored by IEEE, June 29 July 1, Niš, Serbia and Montenegro.
- 3. 'Temperature profile of the impulse discharge''. ICEST 2007, sponsored by IEEE, 24-27 June, 2007, Ohrid, Macedonia.
- 4. "On the application of the multidimensional statistical techniques for exploring copper bromide vapor laser". The 34th Conf. AMEE'08, June 6 12, 2008, Sozopol, Bulgaria.
- 5. "Prognosis of the Copper Bromide Laser Generation through Statistical Methods", XVII Int. Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers 2008, sponsored by SPIE, September 15-19, Lisbon, Portugal.
- 6. "Application of MARS for the construction of nonparametric models", 39th Spring Conf. of the Union of Bulgarian Mathematicians, April 6-10, 2010, Albena, Bulgaria (**invited**).
- 7. "Using multivariate adaptive regression splines for modeling laser data". Int. Conf. Mathematics in Industry, July 11-13, 2010, Sofia, Bulgaria.
- 8. "Mathematical modelling and simulation of radial temperature profile of strontium bromide lasers". Int. Sci. Conf. REMIA'2010, 10-12-14 December 2010, Plovdiv, Bulgaria (**invited**).
- 9. "Application of MARS models for predicting laser efficiency and power of a copper bromide vapor laser". Seminar Katedru Mathematiki, Prague Tech. University, 19.04.2011, Prague.
- 10. "Mathematical modeling and simulation of radial temperature profile of strontium bromide laser". Seminar Katedru Mathematiki, Prague Technical University, 20.04.2011, Prague.
- 11. "Short-time air pollution forecasts using predictive modeling techniques". 5th Conf. AMITANS'2013, 24-29 June, 2013, Albena, Bulgaria.
- "An Application of CART Method for Modeling the Output Power of Copper Bromide Laser". ICMCS 2013: International Conference on Mathematics and Computational Science, 5-6 June 2013, New York.
- 13. "Application of the Generalized Pathseeker regularized regression", 43th Spring Conf. of Bulgarian Mathematicians, 2-6 April 2014, Borovetz, Bulgaria (**invited**).
- 14. "Analytic Model of the Breakdown of Argon at Low Pressure in Combined Electric Fields". 2nd Int. Conf. on Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (ICAESAM2014), International Institute of Engineers, May 4-5, 2014, Istanbul, Turkey.
- 15. "On Time Series Analysis and Forecasting for Air Pollution in Small Urban Area by SARIMA and Factor Analysis", Babes-Bolyai University, 21 June 2014, Cluj-Napoca, Romania.
- "Using Principal Component Analysis and General Path Seeker Regression for Investigation of Air Pollution and CO Modeling". 7th Conf. AMITANS'2015, June 28-July 3, 2015, Albena, Bulgaria.
- 17. "Modeling the Effect of Meteorological Factors on SO2 and PM10 Concentrations in SARIMA Method and Model Refinement". 7th Conf. AMITANS'2015, June 28-July 3, 2015, Albena, Bulgaria.

Б) Публикации, разработени и финансирани по проекти

N⁰	Тема на договора	Публи
		кация
1	НПД на ПУ, 03М28, "Моделиране на лазери с метални пари и	D1, D2
	взаимодеиствието им с веществото", 2003-2004.	
2	НПД на ПУ, 05М47, "Числено изследване на характеристиките на	D3
	високочестотна плазма", 2005-2006.	
3	МОН, Фонд Научни Изследвания, ВУ-МИ-205/2006 "Разработка на	D4, D5,
	софтуерни продукти за компютърно симулиране на физичните процеси в	D6
	газовия разряд с приложение в малки и средни предприятия, 2006-2010.	
4	НПД, № 07М07, "Математическо и информационно моделиране на	D4, D5
	импулсни и газови лазери", 2007-2008.	
5	НПД на ПУ, РС-2009-М13, "Статистически и математически модели в	D6, D7,
	планирането на експеримента с подобрени изходни характеристики за	D8
	лазери с метални пари", 2009-2010.	
6	НПД на ПУ, НИ11 ФМИ-004, "Разработка и приложение на иновативни	D10,
	ИКТ за провеждане на качествени конкурентоспособни научни изследвания	D11
	и цялостно осъвременяване процеса на обучение във ФМИ", 2011/2012.	
7	Проект BG051PO001/3.3-05-0001 "НАУКА И БИЗНЕС", ОП на ЕСФ,	D9
	Договор № ДО2-736/02.08.2012, Индекс: П-4-10/2012, за подкрепа на	
	специализирани публикации в реферирани издания и издания с импакт	
	фактор, 2012.	
8	НПД на ПУ, НИ13 ФМИ-002, "Интеграция на ИТ в научните изследвания	D14,
	по математика, информатика и педагогика на обучението", 2013/2014.	D16,
		D17
9	Проект BG051PO001/3.3-05-0001 "НАУКА И БИЗНЕС", по ОП, ЕСФ,	D12
	Договор № ДО2-185/14.02.2013, Индекс: 11-6-10/13, 2013.	
10	ВG051PO001/3.3-05-0001 "НАУКА И БИЗНЕС", по ОП на ЕСФ, Договор	D15
	№ ДО2-173/14.02.2013, Индекс: П-6-27/13, 2013.	
11	НПД на ПУ, НИ15-ФМИ-004, "Иновативни фундаментални и приложни	D18,
	научни изследвания по компютърни науки, математика и педагогика на	D19
	обучението", 2015/2016.	

Декларация за оригиналност

от проф. д-р Снежана Георгиева Гочева-Илиева, катедра "Приложна математика и моделиране", Факултет по математика и информатика на Пловдивския университет "Паисий Хилендарски"

Във връзка с провеждането на процедура за придобиване на научната степен "Доктор на науките" във ФМИ на ПУ "Паисий Хилендарски" и защита на представения от мен дисертационен труд на тема: "Аналитични, статистически и интелигентни методи за моделиране", декларирам:

Резултатите и приносите в проведените научни изследвания, включени в дисертационния труд са оригинални и не са заимствани от изследвания и публикации, в които нямам участие.

Noule

25.01.2016 г. гр. Пловдив Декларатор: Проф. д-р Снежана Гочева-Илиева

Благодарности

Използвам случая да изкажа своите благодарности към Акад. Никола Съботинов и членовете на екипа на Лабораторията по Лазери с метални пари при Института по Физика на твърдото тяло, БАН, за интересните проблеми, съдействието и дългогодишната съвместна научна дейност, без които този труд не би бил възможен.

Изказвам благодарности и на своите съавтори за екипната работа и полезните обсъждания.

Благодаря също и на ръководството на Факултета по математика и информатика и членовете на катедра "Приложна математика и моделиране", и на всички колеги, които са ме подкрепяли и са били съпричастни към моята работа.

БИБЛИОГРАФИЯ

- 1. 50W Copper Bromide Laser, NATO contract Science for Piece, 97 2685, 2000.
- 2. Abdul-Wahab S. A., Bakheit C. S., Al-ALawi S. M. Principal component and multiple regression analysis in modelling of ground-level ozone and factors affecting its concentrations. Environ Modell & Softw, 20(5), 1263-1271, 2005.
- 3. Abramowitz, M., Stegun I. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 9th ed., Dover Publications, New York, 1964.
- Adnan, N., Ahmad, M. H., Adnan, R. A comparative study on some methods for handling multicollinearity problems, Matematika, 22 (2) 109-119, 2006. <u>http://eprints.utm.my/3662/</u> <u>http://eprints.utm.my/3662/</u>
- 5. Air Pollution, GreenFacts (Particulate Matter, Nitrogen Dioxide, Ozone, Nitrogen oxides (NOx)), <u>http://www.greenfacts.org/en/digests/air-pollution.htm</u>, <u>http://www.greenfacts.org/en/particulate-matter-pm/</u>, <u>http://www.greenfacts.org/en/ozone-o3/index.htm</u>#, <u>http://www.greenfacts.org/glossary/mno/nitrogen-oxides-nox-nitric-oxide-no-nitrogen-dioxide-no2.htm</u>
- 6. Air Pollution, World Health Organization, <u>http://www.who.int/topics/air_pollution/en/</u>
- Air Quality Guidelines for Europe, 2nd ed. World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe, 2000, Copenhagen. <u>http://apps.who.int/iris/handle/10665/107335</u>
- 8. Air quality in Europe 2014 report, European Environment Agency, Publications, 19 Nov 2014.
- 9. Air Quality Standards, European Commission. Environment. 2015. http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm.
- 10. Akaike H. A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control, 19 (6) 716-723, 1974.
- 11. Aldenderfer M.S., Blanshfield R.K. Cluster Analysis, Iowa, Sage Publication Inc. 1984.
- 12. Ambient (outdoor) air pollution in cities database 2014, WHO, http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/
- 13. Araghinejad S. Data-Driven Modeling: Using MATLAB® in Water Resources and Environmental Engineering. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014.
- Astadjov D. N., Dimitrov K. D., Jones D. R., Kirkov V. K., Little C. E., Sabotinov N. V., Vuchkov N. K. Copper Bromide Laser of 120-W Average Output Power. IEEE J of Quantum Electronics, 33(5) 705-709, 1997.
- 15. Astadjov D. N., Vuchkov N. K., Sabotinov N. V. Parametric Study of the CuBr Laser with Hidrogen Additives. IEEE J Quant Electr, 24(9) 1926-1935, 1988. DOI: 10.1109/3.7136
- 16. Astadjov, D. N., Dimitrov K. D., Little C. E., Sabotinov N. V., A CuBr laser with 1.4 W/cm3 average output power, IEEE J Quant Electronics, 30, 1358-1360, 1994.
- 17. Astadjov, D. N., K. D. Dimitrov, D. R. Jones, V. L. Kirkov, C. E. Little, N. Little, Sabotinov N. V et al. Influence on operating characteristics of scaling sealed-off CuBr lasers in active length, Opt. Commun. 135, 289-294, 1997.
- 18. Astadjov, D. N., Sabotinov N. V., Vuchkov N. K. Effect of hydrogen on CuBr laser power and efficiency, Opt Commun, 56, 279-282, 1985.
- 19. Auerhammer J. M., Walker R., van der Meer A. F. G., Jean B. Dynamic behavior of photoablation products of corneal tissue in the mid-IR: a study with FELIX, Appl Phys B- Lasers Opt, 68, 111-119, 1999.
- 20. Azid A., Juahir H., Toriman M. E. et al., Prediction of the Level of Air Pollution Using Principal Component Analysis and Artificial Neural Network Techniques: a Case Study in Malaysia, Water,

Air, & Soil Pollution, Springer Intern. Publishing, 225-2063, July 2014. DOI 10.1007/s11270-014-2063-1. <u>http://link.springer.com/article/10.1007/s11270-014-2063-1</u>

- Beev K., Temelkov K., Vuchkov N., Petrova T., Dragostinova V., Stoycheva-Topalova R., Sainov S., Sabotinov N. Optical properties of polymer films for near UV recording. J Optoelectr Adv Materials, 7, 1315-1318, 2005.
- 22. Bergmann H., Salimbeni R., Sabotinov N., Mizeraczyk J., Wallimann C., Kostadinov I., "Development of a system based on a high power and high efficiency Copper Bromide laser for precision materials processing," Project NATO SfP – 972685, "NATO SfP – Copper Bromide Laser", Final Report, November 2002.
- 23. Berthouex, P. M., Brown, L. C. Statistics for Environmental Engineers, 2nd edn., Lewis Publishers, CRC, Boca Raton, 2002.
- 24. Blau, P. "Impedance matching and electric field penetration in metal vapour lasers", in Pulsed metal vapor lasers physics and emerging applications in industry, medicine and science, eds. Little C.E., Sabotinov N.V., Kluwer Academic Publishers, Dordreht, 1996, 215-220.
- 25. Bogaerts A., De Bleecker K., Georgieva V., Herrebout D., Kolev I., Madani M., Neyts E. Numerical modeling for a better understanding of gas discharge plasmas, High Temper Mater Processes, 9 (3), 321-344, 2005.
- 26. Bogaerts A., Gijbels R. Hybrid Monte-Carlo model for a microsecond pulsed glow discharge, J Anal At Spectrom, 15, 895-905, 2000.
- 27. Bogaerts A., Gijbels R. Numerical modelling of gas discharge plasmas for various applications, Vacuum, 69 (1-3) 37-52, 2002.
- Bogaerts A., Yan M., Gijbels R., Goedheer W. J. Modeling of α and γ Ionization of Argon in an Analytical Capacitively Coupled Radio-Frequency Glow Discharge, J Appl Phys, 86, 2990-3004, 1999.
- 29. Boichenko A. M., Evtushenko G. S. Simulation of a CuBr Laser in the Presence and in the Absence of Hydrogen Impurity, Laser Physics, Springer, 18 (4), 403–412, 2008.
- 30. Boichenko A. M., Evtushenko G. S., Torgaev S. N. Simulation of a CuBr laser, Laser Physics, Springer, 18 (12), 1522-1525, 2008.
- 31. Boichenko A. M., Evtushenko G. S., Yakovlenko S. I., Zhdaneev O. V. The influenceof the initial density of metastable states and electron density on the pulse repetition rate in a copper-vapor laser, Laser Physics, Springer, 11 (5), 580-588, 2001.
- 32. Boichenko A. M., Evtushenko G. S., Yakovlenko S. I., Zhdaneev O. V., Theoretical analysis of mechanisms behind the influence of hydrogen admixtures on lasing characteristics of a copper-vapor laser, Laser Physics, Springer,13 (10), 1231-1255, 2003.
- 33. Boichenko A. M., Evtushenko G. S., Yakovlenko S. I., Zhdaneev O. V. Analysis of the effect of hydrogen impurities on the work of the active element of a Kristall LT-40 copper-vapor laser, Laser Physics, Springer, 14 (8) 1031-1035, 2004.
- 34. Boichenko A. M., Evtushenko G. S., Zhdaneev O. V., Yakovlenko S. I., Theoretical analysis of mechanisms behind the influence of hydrogen additions on the emission parameters of a copper vapor laser, Quantum Electronics, 33 (12) 1047-1058, 2003.
- Boley C. D., Molander W. A., Warner B. E. Computational model of copper laser, Technical Report, Livermore, CA: University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 1997. DOI: 10.2172/641350
- 36. Bowley, A.L. Elements of Statistics, Charles Scribner's Sons, New York, 1920.
- 37. Box G. E. P., Cox D. R. An analysis of transformations. J Royal Stat Soc, Ser B, 26, 211–252, 1964. Wiley.
- 38. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. S. Time Series Analysis, Forecasting and Control, 3rd ed., New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1994.

- 39. Box G. E. P., Jenkins G. M., Time Series Analysis, Forecasting and Control, Holden Day, San Francisco, 1976.
- 40. Breiman L. Statistical Modeling: The Two Cultures, Stat Sci, 16(3) 199–231, 2001. (with Comments).
- 41. Breiman L., Friedman J. H., Olshen R.A., Stone C. J. Classification and Regression Trees, Belmont, Wadsworth Advanced Books and Software, Canada, 1984.
- 42. Brockwell, P.J., Davis, R.A. Time Series: Theory and Methods, Springer-Verlag, New York, 1987.
- 43. Brunelli U., Piazza V., Pignato L., Sorbello F., Vitabile S. Two-days ahead prediction of daily maximum concentrations of SO2, O3, PM10, NO2, CO in the urban area of Palermo, Italy. Atmos Environ, 41(11), 2967-2995, 2007. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.12.013
- 44. Burnham K. P., Anderson D. R. Model selection and inference: a practical information-theoretic approach, 2nd edn. Springer, New York, 2002.
- 45. Burrows W.R., Benjamin M., Beauchamp S., Lord E.R., McCollor D., Thomson B. CART Decision-Tree Statistical Analysis and Prediction of Summer Season Maximum Surface Ozone for the Vancouver, Montreal, and Atlantic Regions of Canada. J Appl Meteor, 34, 1848–1862, 1995. doi: <u>http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<1848:CDTSAA>2.0.CO;2</u>
- 46. Carman R. J. A time-dependent two electron group model for a discharge excited He-Sr recombination laser, J Phys D: Appl Phys, 24, 1803-1810, 1991.
- 47. Carman R. J. Computer modelling of longitudinal excited elemental copper vapour lasers, in Pulsed metal vapor lasers physics and emerging applications in industry, medicine and science, eds. Little C.E., Sabotinov N.V., Kluwer Academic Publishers, Dordreht, 203-214, 1996.
- 48. Carman R. J., Mildren R. P., Withford M. J., W. Brown D. J., Piper J. A. Modeling the plasma kinetics in a kinetically enhanced copper vapor laser utilizing HCl+H2 admixtures, IEEE J Quant Electron, 36 (4), 438-449, 2000.
- 49. Carman, R.G., Brown D.J.W., Piper A. A Self-Consistent Model for the Discharge Kinetics in a High-Repetition-Rate Copper-Vapor Laser. IEEE J Quant Electr, 30(8) 1876-1895, 1994.
- 50. Charged Particle Devices: Opera Simulation Software. <u>http://operafea.com/</u>
- 51. Choi W., Paulson S.E., Casmassi J., Winer A.M. Evaluating meteorological comparability in air quality studies: Classification and regression trees for primary pollutants in California's South Coast Air Basin. Atmos Environ 64, 150-159, 2013.
- 52. Christensen R., Plane Answers to Complex Questions: The Theory of Linear Models, 4nd edn., Springer, 2011.
- 53. Clifton C., Encyclopædia Britannica: Definition of Data Mining, 2010. http://www.britannica.com/technology/data-mining
- 54. Coman A, Ionescu A, Candau Y. Hourly ozone prediction for a 24-h horizon using neural networks. Environ Model Softw, 23, 1407–1421, 2008.
- 55. Computation with SOLO Power Analysis. BMDP Statistical Software Inc., Los Angeles, 1993.
- 56. Comrie A., Diem J. E., Climatology and forecast modeling of ambient carbon monoxide in Phoenix, Arizona. Atmos Environ, 33, 5023–5036, 1999.
- 57. Craven P, Wahba G. Smoothing noisy data with spline functions: estimating the correct degree of smoothing by the method of generalized cross-validation. Numer Math 31, 377-403, 1979.
- 58. de Castro BMF, Manteiga WG. Boosting for real and functional samples: an application to an environmental problem. Stoch Environ Res Risk Assess, 22(1) 27–37, 2008.
- 59. De Gooijer J. G., Hyndman R. J., 25 years of time series forecasting, Int J Forecasting, 22, 443-473, 2006.
- 60. Denev N. P., Astadjov D. N., Sabotinov N. V. Analysis of the copper bromide laser efficiency, Proc. of the Fourth Int. Symp. on Laser Technologies and Lasers' 2005, Plovdiv, 153-156, 2006.
- 61. Di'az-Robles L. A., Ortega J. C., Fu J. S., Reed G. D., Chow J. C., Watson J. G., Moncada-Herrera

J. A. A hybrid ARIMA and artificial neural networks model to forecast particulate matter in urban areas: the case of Temuco, Chile. Atmos Environ, 42(35) 8331-8340, 2008. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.020

- 62. Dickey, D. A., W. A. Fuller, Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root, J Am Stat Assoc, 74(366a), 427-431, 1979. DOI: 10.1080/01621459.1979.10482531.
- 63. Dimitrov K. D., Sabotinov N. V., "High-Power and High-Efficiency Copper Bromide Laser" in Ninth International School on Quantum Electronics: Lasers-Physics and Applications, ed. P. A. Atanasov, SPIE Conf. Proc. 3052, Bellingham, SPIE, 126-130, 1996.
- 64. Dimov I., Georgieva R., Ivanovska S., Ostromsky T., Zlatev Z. Studying the sensitivity of pollutants' concentrations caused by variations of chemical rates. J Comput Appl Math, 235, 391-402, 2010. doi:10.1016/j.cam.2010.05.041
- 65. Dimov I., Georgieva R., Ostromsky T., Zlatev Z. Advanced algorithms for multidimensional sensitivity studies of large-scale air pollution models based on Sobol sequences. Comput Math Appl 65(3) 338-351, 2013. doi: 10.1016/j.camwa.2012.07.005
- 66. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, Official Journal of the European Union, L 152/1, 2008. <u>http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:</u> 0001:0044:EN:PDF. http://www2.moew.government.bg/europe/sectors/air_e.html
- 67. DISTREL, NIKIN, Astrokettle algorithms. (<u>www.astrokettle.com</u>), <u>http://www.astrokettle.com/p_distr.html</u> <u>http://www.astrokettle.com/p_nikin.html</u>
- 68. Donev E., Zeller K., Avramov A. Preliminary background ozone concentrations in the mountain and coastal areas of Bulgaria, Environ Pollut, 117(2) 281-286, 2002.
- 69. Dueñas C., Fernández M.C., Cañete S., Carretero J., Liger E. Stochastic model to forecast groundlevel ozone concentration at urban and rural areas. Chemosphere. 61(10), 1379-89, 2005. doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.079.
- 70. D'Urso P., Giovanni L., Massaria R. Time series clustering by a robust autoregressive metric with application to air pollution, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 141, 107–124, 2015.
- 71. Edwards G., Logan R., Copeland M., Reinisch L., Davidson J., Johnson B., Maciunas R., Mendenhall M., Ossoff R., Tribble J., Werkhaven J., O'Day D. Tissue ablation by a free-electron laser tuned to the amide II band. Nature, 371(6496) 416-419, 1994.
- 72. EEA (European Environment Agency): Particulate matter (PM10): annual mean concentrations in Europe. <u>http://www.eea.europa.eu/themes/air/interactive/pm10</u>. 2014.
- 73. EEA Daily Bulletin for air quality in the country, EEA Executive environment agency, National system for realtime air quality control in Bulgaria. <u>http://pdbase.government.bg/airq/bulletin-en.jsp</u>
- 74. EEA Reports, Bulletins. EEA-Executive environment agency.
http://eea.government.bg/en/output/index.html.EEA-Executive environment agency.
2014http://eea.government.bg/bg/nsmos/spravki/2015/air2 доклад 20152014
- 75. El-Bahu M. M. A numerical modelling of microdischarge threshold in uniform electric fields, J Phys D: Appl Phys, 38, 103-112, 2005.
- 76. Enders W. Applied Econometric Time Series, 4th ed. Wiley, New York, 2014.
- 77. Everaert G., Bennetsen E., Goethals P.L.M., An applicability index for reliable and applicable decision trees in water quality modelling, Ecol Informatics 32, 1–6, March 2016. Open access doi:10.1016/j.ecoinf.2015.12.004
- 78. EViews for Windows, http://www.eviews.com
- 79. Executive Environment Agency (ExEA), Bulgaria. http://eea.government.bg/en
- 80. Foster P. G. Industrial applications of copper bromide laser technology, Ph.D. dissertation, University of Adelaide, School of Chemistry and Physics, Department of Physics and Mathematical Physics, Adelaide, Australia, 2005.

- 81. Friedman J. H. Fast sparse regression and classification. Stanford University, Technical Report, 2008; and Int J Forecasting, 28(3) 722-738, 2012. Elsevier, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2012.05.001.
- 82. Friedman J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. 1999 Reitz Lecture. Annals of Statistics, 29(5) 1189-1232, 2001.
- 83. Friedman J. H. Multivariate adaptive regression splines (with discussion), Annals of Statistics, 19(1), 1-141, 1991. doi:10.1214/aos/1176347963.
- 84. Friedman J. H., Popescu B. E. Importance Sampled Learning Ensembles, Technical report, Stanford University, Calif, USA, 2003, <u>http://www-stat.stanford.edu/~jhf/ftp/isle.pdf</u>.
- 85. Friedman J. H., Popescu B. E. Predictive Learning Via Rule Ensembles, 2005. <u>http://www-stat.stanford.edu/~jhf/ftp/RuleFit.pdf</u>, 2014.
- 86. Friedman, J., Hastie, T. Tibsharini, R. Regularization paths for generalized linear models via coordinate descent. J Stat Softw, 33(1) 1-22, 2010.
- 87. Ganev K., Syrakov D., Prodanova M., Atanasov E., Gurov T., Karaivanova A., Miloshev N., Chervenkov H. Grid Computing for Air Quality and Environmental: Studies in Bulgaria, EnviroInfo 2009 (Berlin), Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools, Shaker Verlag, pp. 147-155, 2009.
- Gardner M. W., S. R. Dorling, Neural network modelling and prediction of hourly NOx and NO2 concentrations in urban air in London. Atmos Environ, 33(5), 709-719 (1999). doi:10.1016/S1352-2310(98)00230-1.
- 89. Gel Y. R., Gastwirth J. L. A robust modification of the Jarque-Bera test of normality, Econ Lett, 99(1) 30-32, 2008.
- 90. Ghani B. A., Hammadi M. Modeling the plasma kinetics mechanisms of CuBr laser with neonhydrogen additives, Opt Las Technol, 38, 67-76, 2006. doi:10.1016/j.optlastec.2004.11.008
- 91. Gocheva-Ilieva S. G., Iliev I. P. "Modeling and prediction of laser generation in UV copper bromide laser via MARS," in Advanced research in physics and engineering, series "Mathematics and Computers in Science and Engineering", ed. O. Martin et al., Proc. 5th International Conference on Optics, Astrophysics and Astronomy (ICOAA '10), Cambridge, UK, February 20-22, 2010, WSEAS Press, pp. 166-171, 2010.
- Gocheva-Ilieva S. G., Iliev I. P. Nonlinear regression model of copper bromide laser generation, Proc. COMPSTAT'2010, Eds. Lechevallier Y., Saporta G., 19th Inter. Conf. Computational Statistics, Paris - France, August 22-27, 2010. Physica-Verlag, Springer_ebook, pp. 1063-1070, 2010. <u>http://www-roc.inria.fr/axis/COMPSTAT2010/images/contents_ebook.pdf</u>
- 93. Gocheva-Ilieva S. G., Iliev I. P. Parametric and nonparametric empirical regression models: case study of copper bromide laser generation, Math Probl Eng, vol. 2010, Article ID 697687, 15 pages, 2010.
- 94. Gocheva-Ilieva S. G., Iliev I. P. Statistical models of characteristics of metal vapor lasers, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2011.
- 95. Gocheva-Ilieva S. G., Kulin C. P. Development of LasSim software prototype for simulating physical characteristics of laser devices, Scientific Works of Plovdiv University, 37, book 3-Mathematics, 45-52, 2010.
- Grozeva M., Kocik M., Mentel J., Mizeraczyk J., Petrov T., Telbizov P., Teuner D., Sabotinov N., Schulze J. Laser capabilities of CuBr mixture excited by RF discharge, The European Phys J D, 8(2), 277-286, 2000. DOI 10.1007/s100530050037
- 97. Gubarev, F. A., Trigub, M. V., Evtushenko, G. S., Fedorov, K. V. Influence of the discharge circuit inductance on output characteristics of a CuBr laser, Atmospheric and Oceanic Optics, 26 (6), 559–564, 2013.
- 98. Gubarev, F. A., Trigub, M. V., Fedorov, K. V. Influence of discharge circuit reactance on CuBr laser output, IEEE 2014 15th Intern. Conf. Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and

Electron Devices (EDM), Novosibirsk, Russia, 30.6.-4.07.2014, 309-313, 2014, IEEE. DOI: 10.1109/EDM.2014.6882536

- 99. Guyadec E., Nouvel, P., Regnard, P. A large volume copper vapor +HCI--H2 laser with a high average power. IEEE J Quantum Electronics 41, 879-884, 2005. DOI: 10.1109/JQE.2005.846686
- 100. Gvozdić V., Kovač-Andrić E., Brana J., Influence of Meteorological Factors NO2, SO2, CO and PM10 on the Concentration of O3 in the Urban Atmosphere of Eastern Croatia, Environ Model Assess 16(5) 491-501, 2011.
- 101. Hadi A.S., Ling R. F., Some Cautionary Notes on the Use of Principal Components Regression, The American Statistician, 52, 15-19, 1998.
- 102. Han J., Kamber M., Pei J. Data Mining: Conceps and Techniques, 3 ed., Elsevier, Burlington, MA, 2011.
- 103. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, 2009. 2nd edition. Springer.
- 104. He, Y., Novac J., Glosemeyer D. Mathematica Time Series: A fully integrated environment for time-dependent data analysis, Wolfram Research, Inc., Illinois, USA. 2007. <u>http://media.wolfram.com/documents/TimeSeriesDocumentation.pdf</u>
- 105. Hinkley D. On quick choice of power transformation. J Roy Stat Soc, Ser C (Applied Statistics) 26(1) 67-69. 1977. doi:10.2307/2346869
- 106. Hoerl A. E., Kennard R. W. Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems, Technometrics, 42 (1) 80-86, 1970. doi:10.1080/00401706.1970.10488634.
- 107. http://eea.government.bg/bg/dokladi/threemonth/threemonth_03/air/niva_osn_zamursiteli.pdf
- 108. http://salford-systems.com

109. http://srbu.ru/stroitelnye-materialy/76-vidy-uteplitelej.html

- 110. http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics/crystal_quartz/#
- 111. http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/, SPSS IBM Statistics 22.
- 112. https://en.wikipedia.org/wiki/Data_mining
- 113. https://en.wikipedia.org/wiki/Decision_tree_learning#Gini_impurity
- 114. https://en.wikipedia.org/wiki/Multivariate_adaptive_regression_splines
- 115. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Astadjov D. N., Denev N. P., Sabotinov N. V. Statistical analysis of the CuBr laser efficiency improvement, Opt Laser Technol, 40(4) 641-646, 2008.
- 116. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Astadjov D. N., Denev N. P., Sabotinov N. V. Statistical approach in planning experiments with a copper bromide vapor laser, Quantum Electron, 38(5) 436-440, 2008.
- 117. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Denev N. P., Sabotinov N. V. Statistical Study of the Copper Bromide Laser Efficiency, in Sixth Intern. Conf. Balkan Physical Union-2006, eds. Cetin S. A., Hikmet I., Conf. Proc. AIP, 899, New York: American Institute of Physics, pp. 680, 2007.
- 118. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Model of the radial gas temperature distribution in a copper bromide vapour laser, Quantum Electron, 40, 479-483, 2010.
- 119. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Sabotinov N. V. An improved model of gas temperature in a copper bromide vapour laser, Quantum Electron 39(5) 425-430, 2009. DOI:10.1070/QE2009v039n05ABEH013974
- 120. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Sabotinov N. V. Analytic study of the temperature profile in a copper bromide laser, Quantum Electron, 38(4) 338-342, 2008.
- 121. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Sabotinov N. V. Classification analysis of the variables in a CuBr laser, Quantum Electron, 39, 143-146, 2009.
- 122. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Sabotinov N. V. Modelling of radio-frequency breakdown in argon. Optoelectron Adv Mat 11(10) 1392-1395, 2009.

- 123. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Statistical techniques for examining copper bromide laser parameters, Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM-2007, ed. T. E. Simos et al., AIP Conference Proceedings 936, American Institute of Physics, Melville, NY, 267-270, 2007.
- 124. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Temelkov K. A., Vuchkov N. K., Sabotinov N. V. Modeling of the radial heat flow and cooling processes in a deep ultraviolet Cu+ Ne-CuBr laser. Math Probl Eng, 2009(582732), 2009.
- 125. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Temelkov K. A., Vuchkov N. K., Sabotinov N. V. Analytical model of temperature profile for a He-SrBr2 laser. Optoelectron Adv Mater, 11(11) 1735-1742, 2009.
- 126. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S. G., Temelkov K. A., Vuchkov N. K., Sabotinov N. V. An improved radial temperature model of a high-powered He-SrBr2 laser. Opt Laser Technol 43(3) 642-647, 2011. http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.09.005
- 127. Iliev I., Gocheva-Ilieva S. Numerical study of gas temperature distribution in a copper bromide laser active medium, Fourth Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, St. Constantine and Helena, Varna, Bulgaria, June 11-16, 2012, Ed. M. D. Todorov, AIP Conference Proceedings. 1487, pp. 185-192, 2012. doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.4758957
- 128. Ilieva M., Stoyanova A., Tsakova V., Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Erfurth W., Sabotinov N. V. Effect of deep UV laser treatment on electroless silver precipitation in supported poly-3,4-ethylenedioxythiophene layers, Optoelectron Adv Materials, 11(10) 1444-1447, 2009.
- 129. Ilieva M., Tsakova V., Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Sabotinov N. V. UV copper ion laser treatment of poly-3,4- ethylenedioxythiophene, Optoelectr Adv Materials, 9, 303-306, 2007.
- 130. ISO/IEC 17025 (2013). Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_17025.
- 131. Ivanov A, Voynikova D, Gocheva-Ilieva S, Boyadzhiev D. Parametric time series analysis of daily air pollutants of city of Shumen, Bulgaria. Conf. Proc. AIP 1487, 386-396, 2012. American Institute of Physics, Melville, NY. doi: 10.1063/1.4758982
- 132. Izenman, J., Modern Multivariate Statistical Techniques Regression, Classification, and Manifold Learning, Springer, New York, 2008.
- 133. Jacobson M. Z., Fundamentals of atmospheric modeling, 2nd edn. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2005.
- 134. Janssens W., Wijnen K., De Pelsmacker P., Van Kenhove P. Marketing Research with SPSS, Prentice Hall, Pearson Education, Harlow, 2008.
- 135. Jarque C. M., Bera A. K. Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals, Econ Lett 6(3) 255-259, 1980.
- 136. Jian L., Zhao Y., Zhu Y. P., Zhang M. B., Bertolatti D. An application of ARIMA model to predict submicron particle concentrations from meteorological factors at a busy roadside in Hangzhou, China. Sci Total Environ, 426, 336–345, 2012. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.025.
- 137. John J. A., Draper N. R. An alternative family of transformations, J Roy Stat Soc: C, 29, 190-197, 1980.
- 138. Jolliffe I. T. A note on the Use of Principal Components in Regression. Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics) 31 (3) 300–303, 1982. <u>doi:10.2307/2348005</u>
- 139. Jolliffe I. T. Principal component analysis, 3rd edn. Springer, New York, 2002.
- 140. Kandel N., Koeltz J., Guyon F., Girard R., Bartolini D. A study of socio-economical impact of mathematics in France: Synthesys. May 2015. <u>http://www.agence-maths-entreprises.fr/a/sites/default/files/Eisem/20150527_Study_of_socioeconomical_Impact_of_mathematics_in_France_Synthesis_v1.4.pdf</u>
- 141. Kaplunovsky A. S., Factor analysis in environmental studies. HAIT J Sci Eng B 2(1-2) 54-94, 2005.

- 142. Kelleher J.D., McNamee B., D'Arcy A. Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics: Algorithms, Worked Examples, and Case Studies, The MIT Press 2015.
- 143. Kihara T., The Mathematical Theory of Electrical Discharges in Gases. Rev Modern Phys. 24(1) 45-61, 1952. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.24.45</u>
- 144. Kim H. C., Iza F., Yang S. S., Radmilović-Radjenović M., Lee J. K. Particle and fluid simulations of low-temperature plasma discharges: benchmarks and kinetic effects, J Phys D: Appl Phys 38(19) R283, 2005. http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/19/R01
- 145. Kim S. E., A. Kumar, Accounting seasonal nonstationarity in time series models for short-term ozone level forecast. Stoch Environ Res Risk Asses, 19, 241-248, 2005. doi:10.1007/s00477-004-0228-y.
- 146. Kim S. E., Tree-based threshold modeling for short-term forecast of daily maximum ozone level. Stoch Environ Res Risk Asses, 24(1) 19-28, 2010. doi:10.1007/s00477-008-0295-6.
- 147. Kim T.-H., White H. On more robust estimation of skewness and kurtosis. Finance Res Lett, 1(1) 56–73, 2004.
- 148. Klimovskij I. I., Selezneva L. A., Effect of the non uniformity of the discharge in the gas temperature in copper vapor lasers operating under periodical pulse conditions, Teplofizika vysokih temperatur, 23, 667-672, 1985 (in Russian).
- 149. Ko F. W. S., Tam W., Wong T. W., Chan D. P. S., Tung A. H., Lai C. K. W., Hui D. S. C. Temporal relationship between air pollutants and hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease in Hong Kong. Thorax, 62, 780–785, 2007. doi: 10.1136/thx.2006.076166
- 150. Koekemoer G., Swanepoel J. W. H. A semi-parametric method for transforming data to normality. Statistics and Computing, 18(3) 241-257, 2008.
- 151. Kovač-Andrić E., Radanović T., Topalović I., Marković B., Sakač N. Temporal Variations in Concentrations of Ozone, Nitrogen Dioxide, and Carbon Monoxide at Osijek, Croatia. Adv Meteorol 2013, 1-7, 2013. http://dx.doi.org/10.1155/2013/469786
- 152. Kumar A.V., Patil R. S., Namb K. S. V. Source apportionment of suspended particulate matter at two traffic junctions in Mumbai, India. Atmos Environ, 35(25) 4245–4251, 2001. Doi: 10.1016/S1352-2310(01)00258-8
- 153. Kumar R, Joseph A. E. Air Pollution Concentrations of PM2.5, PM10 and NO2 at Ambient and Kerbsite and Their Correlation in Metro City-Mumbai. Environ Monit Asses, 119(1-3) 191-199, 2006. doi: 10.1007/s10661-005-9022-7
- 154. Kumar U., Jain V. K., ARIMA forecasting of ambient air pollutants (O3, NO, NO2 and CO). Stoch Environ Res Risk Asses, 24, 751-760, 2010. Doi:10.1007/s00477-009-0361-8.
- 155. Kuo YM, Chiu CH, Yu HL. Influences of ambient air pollutants and meteorological conditions on ozone variations in Kaohsiung, Taiwan, Stoch Environ Res Risk Asses, 29(3) 1037-1050, 2015.
- 156. Kushner M. J., A self-consistent model for high repetition rate copper vapor lasers, J Quant Electron QE-17, 1555-1565, 1981.
- 157. Kushner M. J., Warner B. E., Large bore copper vapor lasers: Kinetics and scaling issues, J Appl Phys 54 (6), 2970-2982, 1983.
- 158. Kutz J. N., Data-Driven Modeling & Scientific Computation: Methods for Complex Systems & Big Data, Oxford Univ. Press, 2013. <u>https://en.wikipedia.org/wiki/J._Nathan_Kut</u>
- 159. Lee H.I., Lim Y. Y., Kim B. J., Kim M. N., Min H. J., Hwang J. H., Song K. Y. Clinicopathologic Efficacy of Copper Bromide Plus/Yellow Laser (578 nm with 511 nm) for Treatment of Melasma in Asian Patients, Dermatologic Surgery, 36(6) 885–893, 2010. DOI: 10.1111/j.1524-4725.2010.01564.x
- 160. Lengyel A., Heberger K., Paksy L., Banhidi O., Rajko R., Prediction of ozone concentration in ambient air using multivariate methods. Chemosphere, 57(8) 889-896, 2004. Doi:10.1016/j. chemosphere.2004.07.043.

- 161. Lewis PAW, Stevens JG. Nonlinear Modeling of time series using multivariate adaptive regression splines (MARS). J Am Stat Assoc, 86 (416) 864-877, 1991. DOI:10.1080/01621459.1991.10475126
- 162. Liddle A. R. Information criteria for astrophysical model selection. Cornell University Library, arHiv.org. 2008. <u>http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0701/0701113v2.pdf</u>.
- 163. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J., Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- 164. Lima E. A. P., Guimaraes E. C., Pozza S. A., Barrozo M. A. S., Coury J. R., A Study of Atmospheric Particulate Matter in a City of the Central Region of Brazil Using Time-series Analysis. Int J Environ Eng 1(1) 80-94, 2009. doi: 10.1504/IJEE.2009.026444.
- 165. Lisovskii V. A., Determination of electron transport coefficients in argon from ignition curves of rf and combined low-pressure discharges. Tech Phys Lett 24(4) 308-310, 1998.
- 166. Lisovskiy V. A., Yegorenkov V. D. Low-pressure gas breakdown in combined fields, J Phys D: Appl Phys 27, 2340-2348, 1994.
- 167. Lister G. G. Low-pressure gas discharges modeling, J Phys D: Appl Phys 25, 1649-1680, 1992.
- 168. Liu P. W. G., Simulation of the Daily Average PM10 Concentrations at Ta-Liao with Box-Jenkins Time series Models and Multivariate Analysis. Atmos Environ, 43, 2104-2113, 2009. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.01.055.
- 169. Malinova A., Gocheva-Ilieva S., Application of the business process execution language for building scientific processes for simulation of metal vapour lasers, Conf. Proc. 3th Balkan Conference in Informatics (BCI'2007), 27-29 September 2007, Sofia, Bulgaria, 2, 75-86, 2007.
- 170. Malinova A., Gocheva-Ilieva S., Using the business process execution language for managing scientific processes, Int J Information Technolo Knowledge (IJITK), Украйна, 2(3) 257-261, 2008.
- 171. Malinova A.A., Gocheva-Ilieva S. G., Iliev I. P. "Wrapping legacy codes for numerical simulation applications," in Proc. Third Intern. Bulgarian-Turkish Conf. Computer Science'06, 12 15 October, 2006, Istanbul, Turkey, Part II, pp. 202-207, 2007.
- 172. Mao B. N., Chen G., Wang Y. B., Chen L., Pan B. L. Численное изучение влияния параметров на работу УФ Ne-CuBr-лазера в продольном импульсном разряде. Wuli xuebao 56 (6) 2652-2656, 2007.
- 173. Mao B. N., Pan B. L., Chen L., Wang Y. J., Yao Z. X. Kinetic analysis of the factors limiting the output power of the Ne–CuBr UV laser. Chinese Phys B 18, 1542-1546, 2009. DOI: 10.1088/1674-1056/18/4/041
- 174. Martin M. L., Turias I. J., Gonzalez F. J., Galindo P. L., Trujillo F. J., Puntonet C. G., Gorriz J. M. Prediction of CO maximum ground level concentrations in the Bay of Algeciras, Spain using artificial neural networks. Chemosphere 70(7) 1190–1195, 2008.
- 175. Massy, W. F. Principal components regression in exploratory statistical research. J Am Stat Assoc 60, 234-246, 1965.
- 176. McBerthouex P., Brown L. C., Statistics for Environmental Engineers, 2nd ed. Lewis Publishers, CRC Press LLS, Boca Raton, 2002.
- 177. Milionis A. E., Davies T. D., Regression and stochastic models for air pollution. I. Review, comments and suggestions. Atmos Environ 28, 2801-2810, 2002. doi:10.1016/1352-2310(94)90083-3.
- 178. Milionis A. E., T. D. Davies, Box-Jenkins univariate modelling for climatological time series analysis: an application to the monthly activity of temperature inversions. Int J Climatol 14, 569-579 (1994).
- 179. Moazami S., Noori R., Amiri B.J., Yeganeh B., Partani S., Safavi S. Reliable prediction of carbon monoxide using developed support vector machine. Atmos Pollut Res 1-Nov-2015 (in press) doi:10.1016/j.apr.2015.10.022

- 180. Mouchovski J. T., K. A. Temelkov, N. K. Vuchkov, and N. V. Sabotinov, Calcium strontium fluoride crystals with different composition for UV-laser application: control of growing rate and optical properties, Comp Rend l'Acad Bulgare des Sciences 62(6), 687-694, 2009.
- 181. Muñoz E., Martin M. L., Turias I. J., Jimenez-Come M. J., Trujillo F. J. Prediction of PM10 and SO2 exceedances to control air pollution in the Bay of Algeciras, Spain. Stoch Environ Res Risk Asses 3, 1409-1420, 2014.
- 182. Nagendra S. M. S., Khare M. Artificial neural network approach for modelling nitrogen dioxide dispersion from vehicular exhaust emissions. Ecol Modell 190, 99-115, 2006.
- 183. Nash, J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models: I. A discussion of principles. J Hydrol 10, 282–290, 1970. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- 184. National System for Environmental Monitoring, Bulgaria (2013). http://eea.government.bg/en/nsmos/index.html
- 185. Nejadkoorki F., Baroutian S. Forecasting extreme PM(10) concentrations using artificial neural networks. Int J Environ Res 6, 277–284, 2012.
- 186. Nisbet R., Elder J., Miner G. Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications, Burlington, MA: Academic Press Elsevier Inc., 2009.
- 187.NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/.
- 188. Özişik M.N. Heat Transfer. A Basic Approach. Boston, McGraw-Hill, 1985.
- 189. Pan B. L., Chen G., Mao B. N., Yao Z. X. Kinetic process of UV Cu+ laser in Ne-CuBr longitudinal pulsed discharge. Opt Express 14, 8644-8653, 2006.
- 190. Pan B.-L., Chen G., Chen X., Yao Z.-X. Numerical and experimental investigation on self-terminating and recombination lasers in univalent ions of calcium and strontium. J Appl Phys 96, 34-39, 2004.
- 191. Pan B.L., Yao Z.X., Chen G. A discharge-excited SrBr₂ vapour laser, Chin Phys Lett 19(7), 941-943, 2002.
- 192. Pankratz A., Forecasting with univariate Box-Jenkins models: concepts and cases. Wiley, New York, 1983.
- 193. Paschen F., On the potential difference required for spark initiation in air, hydrogen, and carbon dioxide at different pressures, Ann. der Physik 273(5), 69-96, 1889.
- 194. Peavy G. M., Reinisch L., Rayne G. T., Venugopalan V. Comparison of cortical bone ablations by using infrared laser wavelength 2.9 to 9.2 μm. Laser Surg Med 25, 421-434, 1999.
- 195. Petelin D, Grancharova A, Kocijana J. Evolving Gaussian process models for prediction of ozone concentration in the air. Simul Model Pract Th (EUROSIM 2010) 33, 68–80, 2013. doi: <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2012.04.005</u>
- 196. Petrash G. G. On the Simulation of a Copper Vapour Laser with Hydrogen Admixtures. Quantum Electron 35 (6) 576-577, 2005.
- 197. Pires J. C. M., Martins F. G., Sousa S. I. V., Alvim-Ferraz M. C. M., Pereira M. C. Selection and validation of parameters in multiple linear and principal component regressions. Environ Modell & Softw 23(1) 50-55, 2008. DOI: 10.1016/j.envsoft.2007.04.012.
- 198. Platonov A.V., Soldatov A.N., Filonov A.G. Pulsed Strontium Vapor Laser. Sov J Quant Electon 8, 120-121, 1978.
- 199. Polydoras G.N., Anagnostopoulos J.S., Bergeles G.Ch. Air quality predictions: dispersion model vs Box-Jenkins stochastic models. An implementation and comparison for Athens, Greece. Appl Therm Eng 18(11) 1037–1048, 1998. doi: 10.1016/S1359-4311(98)00016-7.
- 200. Prakash A., Kumar U., Kumar K., Jain V. A wavelet-based neural network model to predict ambient air pollutants' concentration. Environ Model Assess 16(5) 503-517, 2011.

- 201. Prodanova M., Perez J. L., Syrakov D., San Jose R., Ganev K., Miloshev N., Roglev S. Application of mathematical models to simulate an extreme air pollution episode in the Bulgarian city of Stara Zagora. Appl Math Modell 32(8) 1607-1619, 2008.
- 202. Quarteroni A. Mathematical models in science and engineering. Notices of the AMS 56(1), 10-19, 2009. <u>http://www.ams.org/notices/200901/tx090100010p.pdf</u>
- 203. Radimović-Radjenović M., Lee J. K., Petrović Z. Lj. Low-pressure argon breakdown in combined dc and rf fields. XXVIIth ICPIG, Eindhoven, the Netherlands, 18-22 July, 2005, Topic number 17, p.121.
- 204. Radmilović-Radjenović M., Lee J. K. Modeling of breakdown behavior in radio-frequency argon discharges with improved secondary emission model. Phys Plasmas 12(063501) 1-8, 2005.
- 205. Radmilović-Radjenović M., Radjenović B. Modeling of a low-pressure argon breakdown in combined fields. Plasma Sources Sci Technol 15, 1-7, 2006.
- 206. Radmilović-Radjenović M., Radjenović B. The Influence of the Magnetic Field on the Electrical Breakdown Phenomena. Plasma Sources Sci Technol 19(1) 45-51, 2007.
- 207. Raizer Y. P., Schneider M. N., Yatsenko N. A. Radio-Frequency Capacitive Discharges, CRC, New York, 1995. (Ю. П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яценко, Высокочастотный емкостный разряд, МФТИ, Москва, 1995).
- 208. Reich N., Mentel J., Mizeraczyk J. CW Radio-Frequency Excited White-Light He-Cd⁺ Laser. IEEE J. Quant Electron, 31, 1902-1909, 1995.
- 209. Rencher A. C., Methods of Multivariate Analysis, Second edition, New York: Wiley, 2002.
- 210. Richman M. B., Rotation of principal components. J Climatol, 6, 293-335, 1986. doi: 10.1002/joc.3370060305
- 211. Ryan C. M., Arch. Memory disturbances following chronic, low-level carbon monoxide exposure. Clin Neuropsych 5(1) 59–67, 1990.
- 212. Sabotinov N. V. "Copper Bromide Lasers," in Pulsed Metal Vapour Lasers, eds. Little C. E., Sabotinov N. V., NATO ASI Series, Disarmament Technologies-5, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 113-124, 1996.
- 213. Sabotinov N. V., Kostadinov I. K., Bergmann H. W., Salimbeni R., Mizeraczyk J., "50-W copper bromide laser", in Proc. SPIE 4184, XIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference, Florence, Italy, 18 Setember 2000, pp. 203-206, 2001. doi:10.1117/12.414049; http://dx.doi.org/10.1117/12.414049
- 214. Sabotinov N. V. "Metal vapor lasers," in Gas Lasers, eds. Endo M., Walter R. F., 449-494, CRC Press, Boca Raton, USA, 2006.
- 215. Sabotinov, N. V., Telbizov P. K., Kalchev S. D. Bulg. Inv. Cert. Appl. No. 29874, Copper vapor gas laser, 1975.
- 216. Sabotinov, N. V., Vuchkov N. K., Astadjov D. N. Gas laser discharge tube with copper halide vapors, United States Patent 4635271, 1987.
- 217.Said E. S., Dickey D. A. Testing for unit roots in autoregressive- moving average models of unknown order. Biometrika 71(3), 599-607, 1984. doi:10.1093/biomet/71.3.599.
- 218. Salford Predictive Modeler v.7.0: Users Guide. Introducing Generalized PathSeeker (Salford Systems, San Diego, CA, 2013). http://media.salford-systems.com/pdf/spm7/IntroGPS.pdf
- 219. Sato M., Shoji M. Breakdown characteristics of RF argon capacitive discharge, Jpn J Appl Phys 36, 5729-5730, 1997.
- 220. Sayegh A., Tate J. E., Ropkins K. Understanding how roadside concentrations of NOx are influenced by the background levels, traffic density, and meteorological conditions using Boosted Regression Trees, Atmos Environ 127, 163-175, February 2016. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.12.024
- 221. Schwarz G., Estimating the dimension of a model, Ann Stat, 6, 461-464, 1978. doi:10.1214/aos/1176344136.

- 222. Shahraiyni H. T., Shahsavani D., Sargazi S., Habibi–Nokhandan M. Evaluation of MARS for the spatial distribution modeling of carbon monoxide in an urban area, Atmos Pollution Res 6(4) 581-588, 2015.
- 223. Sharma P., Chandra A., Kaushik S.C. Forecasts using Box–Jenkins models for the ambient air quality data of Delhi City. Environ Monit Assess 157(1-4) 105-112, 2009. doi: 10.1007/s10661-008-0520-2.
- 224. Shi J. P., Harrison R. M. Regression modelling of hourly NOx and NO2 concentrations in urban air in London. Atmos Environ 31, 4081-4094, 1997.
- 225. Shiyanov D. V., Evtuchenko G. S., Sukhanov V. B., Fedorov V. F. Effect of gas mixture composition and pump conditions on the parameters of the CuBr-Ne-H2(HBr) laser, Quantum Electron., 37, 49-52, 2007.
- 226. Simeonov P., Bocheva L., Marinova T., Severe convective storms phenomena occurrence during the warm half of the year in Bulgaria (1961–2006), Atmos Res, 93(1–3) 498-505, 2009.
- 227. Slini T., Kaprara A., Karatzas K., Moussiopoulos N. PM10 Forecasting for Thessaloniki, Greece. Environ Modell Softw, 21(4), 559-565, 2006. http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.06.011.
- 228. Slini Th., Karatzas K., Moussiopoulos N. Statistical analysis of environmental data as the basis of forecasting: an air quality application. Sci Total Environ, 288, 227-237, 2002. doi:10.1016/S0048-9697(01)00991-3.
- 229. Smith H. B., Charles C., Boswell R. W. Breakdown behavior in radio-frequency argon discharges, Phys. Plasmas 10, 875-881, 2003.
- 230. Soldatov A. N., Filonov A., Shumeiko A. S., Kirilov A. E., Ivanov B., Haglund R., Mendenhall M., Gabella B., Kostadinov I., "A Sealed-Off Strontium Vapor Laser," in: Atomic and Molecular Pulsed Lasers V, ed. Tarasenko V. F., Proc. SPIE, 5483, 252-261, 2004.
- 231. Soldatov A. N., Yudin N. A., Vasilieva A. V., Kolmakov E. A., Polunin Yu. P., Kostyrya I. D. Strontium vapour laser with a pulse repetition rate of up to 1 MHz. Quantum Electron., 42 (1), 31-33, 2012. http://dx.doi.org/10.1070/QE2012v042n01ABEH014752
- 232. Son I. P., Park K. Y., Kim B., Kim M. N. Pilot study of the efficacy of 578 nm Copper Bromide laser combined with intralesional corticosteroid injection for treatment of keloids and hypertrophic scars," Ann Dermatol, 26(2) 156-61, 2014, <u>http://dx.doi.org/10.5021/ad.2014.26.2.156</u>.
- 233. Sousa S. I. V., Martins F. G., Alvim-Ferraz M. C. M., Pereira M. C., Multiple linear regression and artificial neural networks based on principal components to predict ozone concentrations. Environ Modell & Softw 22(1), 97–103, 2007. 1364-8152.
- 234. Sousa S. I. V., Pires J. C. M., Martins F. G., Pereira M. C., Alvim-Ferraz M. C. M. Potentialities of quantile regression to predict ozone concentrations, Environmetrics, 20(2) 147–158, 2009.
- 235. Stadlober E., Hubnerova Z., Michalek J., Kolar M. Forecasting of Daily PM10 Concentrations in Brno and Graz by Different Regression Approaches, Austrian J Stat, 41(4) 287–310, 2012.
- 236. Statheropoulos M., Vassiliadis N., Pappa A. Principal component and canonical correlation analysis for examining air pollution and meteorological data. Atmos Environ 32(6) 1087-1095, 1998.
- 237. Steinberg D., Bernstein B., Colla P., Martin K., MARS User Guide, Salford Systems, San Diego, CA, 2001.
- 238. Steinberg D., Golovnya M., CART 6.0 User's Guide, San Diego, CA: Salford Systems, 2007.
- 239. Steinberg D., M. Golovnya, Introduction to Modern Regression: From OLS to GPS® to MARS®
- 240. Steinberg D., M. Golovnya, Tree Ensembles and Extensions An Overview of TreeNet, RandomForests ISLE Model Compression & RuleLearner, <u>http://info.salford-systems.com/jsm-2013-ctw2</u> 2014.
- 241. Stoilov, V. M., Astadjov D. N., Vuchkov N. K., Sabotinov N. V., High spatial intensity 10 W-CuBr laser with hydrogen additives, Opt and Quant Electron, 32, 1209-1217, 2000.

- 242. Syrakov D., Ganev K., Prodanova M., Miloshev N., Jordanov G., Katragkou E., Melas D., Poupkou A., Markakis K. Background pollution forecast over Bulgaria, large-scale scientific computing, Lecture Notes in Computer Science, eds. Lirkov I., Margenov S., Waśniewski J. Springer Berlin Heidelberg, Vol. 5910, 531-537, 2010.
- 243. Tabachnik B. G., Fidell L. S. Using multivariate statistics, 5th edn., Pearson Int. Edition, Boston, 2005.
- 244. Talaat, M.E. A Two-Electron Group Model Theory for Radio-Frequency Ionization of Noble Gases with Turbulent Flow, IEEE Trans Plasma Sci, 19(2), 176-188, 1991.
- 245. Temelkov K.A., Vuchkov N.K., Freijo-Martin I., Lema A., Lyutov L., Sabotinov N.V., Experimental study on the spectral and spatial characteristics of a high-power He-SrBr₂ laser, J Phys D: Appl Phys 42(115105) 1-6, 2009.
- 246. Temelkov K.A., Vuchkov N.K., Mao B., Atanasov E.P., Lyutov L., Sabotinov N.V. High-power Sr atom laser excited in nanosecond pulsed longitudinal He-SrBr2 discharge, IEEE J Quant Electron, 45(3), 278-281, 2009.
- 247. Temelkov K.A., Vuchkov N.K., Pan B.L., Sabotinov N.V., Ivanov B., Lyutov L. Strontium atom laser excited by nanosecond pulsed longitudinal He-SrBr2 discharge, J Phys D: Appl Phys, 39, 3769-3772, 2006.
- 248. Temelkov K.A., Vuchkov N.K., Pan B.L., Sabotinov N.V., Ivanov B., Lyutov L. Strontium bromide vapor laser excited by a nanosecond pulsed longitudinal discharge, Proc. 14th Intern. School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, Atanasov P.A., Dreischuh T.N., Gateva S.V., Kovachev L.M., Eds., Proc. of SPIE, 6604, 660410-1, 2007.
- 249. Tibshirani R., Regression shrinkage and selection via the lasso, J Roy Stat Soc: B, 58(1), 267-288, 1996.
- 250. Tikhonov A. N. On the stability of inverse problems, Doklady Akademii Nauk SSSR, 39(5), 95-198, 1943.
- 251. Tikhonov A. N. Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method, Doklady Akademii Nauk SSSR, 151, 501-504, 1963. Translated in: Soviet Mathematics, 4, 1035–1038, 1963.
- 252. Tiwari G.N., Shukla P.K., Mishra R.K., Shrivastava V.K., Khare R., Nakhe S.V. Effect of addition of hydrogen to neon buffer gas of copper bromide vapor laser on its spectral and temporal characteristic. Opt Commun, 338, 322-327, 2015. doi:10.1016/j.optcom.2014.10.048
- 253. Townsend J. S. The Theory of Ionization of Gases by Collision, Constable, London, 1910.
- 254. Trigub M. V., Zuev V. E., Evtushenko G. S., Gubarev F. A., Torgaev S. N. High-speed process visualization using CuBr-laser, micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), in Proc.2012 IEEE 13th Intern. Conf. Seminar of Young Specialists on, 260-263, 2012. DOI: 10.1109/EDM.2012.6310232
- 255. Ul-Saufie A. Z., Yahaya A. S., Ramli N. A., Rosaida N., Hamid H. A., Future daily PM10 concentrations prediction by combining regression models and feedforward backpropagation models with principle component analysis (PCA). Atmos Environ, 77, 621–630, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.017.
- 256. Vallinga, P.M., Meijer P.M., de Hoog F.J. Sheath Properties of RF Plasmas in a Parallel Plate Etch Reactor; the High-Frequency Regime ($\omega > \omega_i$), J Phys D: Appl Phys 22, 1650-1657, 1989.
- 257. Van der Veeken S., Robust and Nonparametric Methods for Skewed Data, Dissertation of Doctor in Sciences, Katholieke Universiteit Leuven, Arenberg Doctoral School of Science, Engineering and Technology, Faculty of Sciences, Department of Mathematics, Leuven, Belgium, 2010, <u>https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/286471/1/finaleversiephdvanderveekenstephan.P</u> <u>DF</u>.
- 258. Vesely V., Tonner J., Hrdlivckova Z., Michalek J., Kolar M. Analysis of PM10 air pollution in Brno based on generalized linear model with strongly rank-deficient design matrix. Environmetrics, 20(6), 676-698, 2009. doi: 10.1002/env.971.

- 259. Vitanov N. V., Yatsenko L. P., Bergmann K., Population transfer by amplitude-modulated pulse, Phys. Rev. A 68, 043401, 2003.
- 260. Vlachogianni A., Kassomenos P., Karppinen A., Karakitsios S., Kukkonen J. Evaluation of a multiple regression model for the forecasting of the concentrations of NOx and PM10 in Athens and Helsinki. Sci Total Environ 409(8) 1559–1571, 2011.
- 261. Vuchkov N. High discharge tube resource of the UV Cu+ Ne-CuBr laser and some applications. In: New Development in Lasers and Electric-Optics Research, ed. Arkin W. T., Nova Science Publishers, New York, pp. 41-74, 2007.
- 262. Vuchkov N. K., Astadjov D. N., Sabotinov N. V. A new circuit for CuBr laser excitation. Opt Quant Electron 23, S549-S553, 1991.
- 263. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Sabotinov N. V. Effect of hydrogen on the average output of the UV Cu+ Ne-CuBr laser, IEEE J Quantum Electron, 41, 62-65, 2005.
- 264. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Sabotinov N. V. UV Lasing on Cu+ in a Ne-CuBr pulsed longitudinal discharge, IEEE J Quantum Electron, 35, 1799-1804, 1999.
- 265. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Zahariev P. V., Sabotinov N. V. Influence of the active zone diameter on the UV-ion Ne-CuBr laser performance, IEEE J Quantum Electron, 37(12) 1538-1546, 2001. DOI: 10.1109/3.970900
- 266. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Zahariev P. V., Sabotinov N. V. Optimization of a UV Cu+ laser excited by pulse- longitudinal Ne-CuBr discharge", IEEE J Quantum Electron, 37, 511-517, 2001.
- 267. Vuchkov N., Temelkov K., Sabotinov N., Laser tube for strontium infrared laser with strontium halide vapours, BG patent No. 66247, 2012.
- 268. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Zahariev P. V., Sabotinov N.V. Laser tube for ultraviolet copper laser. Bulgarian Patent No. 64880, 03.08.2006.
- 269. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Zahariev P. V., Sabotinov N. V. Output parameters and a spectral study of UV Cu+ Ne-CuBr laser. Opt Laser Technol, 36(1), 19-25, 2004.
- 270. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Sabotinov N. V. Laser tube for strontium infrared laser with strontium halide vapors. reg. No. 110175 from 02.07.2008, Published Applications for Inventions BG 1/2010.
- 271. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Zahariev P. V., Sabotinov N. V. A new laser tube construction for the UV Cu+ Ne-CuBr laser, in Proc. SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineering), Bellingham, WA, USA, 5449, 173-176, 2004.
- 272. Vuchkov N. K., Temelkov K. A., Zahariev P. V., Sabotinov N. V. Laser tube for ultraviolet copper laser, Patent reg., no. 106759, 30.05.2002, Published Applications for Inventions BG 11/2003.
- 273. Vuchkov N., Sabotinov N., Temelkov K., "Ultraviolet Copper laser," Patent Reg. no. 103312, 06.04.1999, Published Applications for Inventions, BG 10/2000.
- 274. Waymouss D. Gas Discharge Tubes, 1977.
- 275. Waymouth J. F. Electric Discharge Lamps, Cambridge, Massachusetts and London: The M.I.T. Press, 1971.
- 276. Webb C. E., Jones J.D.C. Handbook of Laser Technology and Applications, Vol. 3: Applications, Institute of Physics Publishing, Taylor & Francis, Bristol and Philadelphia, 2003.
- 277. Wei W. W. S. Time Series Analysis, Univariate and Multivariate Methods. 2nd edn., Pearson Education, Boston, 2006.
- 278. Wilhelm A., Data and Knowledge Mining, in: Handbook of Computational Statistics, Eds. Gentle J. E., Härdle W., Mori Y., Springer, Heidelberg, pp. 789-820. 2004.
- 279. Wilks D. S., Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 3nd ed. Elsevier, Amsterdam, 2011.
- 280. Wolfram Mathematica, http://www.wolfram.com/mathematica/

- 281. Wu C. L., Chau K. W., Li Y. S. Predicting monthly streamflow using data-driven models coupled with data-preprocessing techniques, Water Resour Res, 45, W08432, 2009. doi:10.1029/2007WR006737.
- 282. Wu H., Zhang J.-T., Nonparametric Regression Methods for Longitudinal Data Analysis. Mixed-Effects, John Willey & Sons, Inc., Hoboken, 2006.
- 283. Wu X, Kumar V (eds.), The Top Ten Algorithms in Data Mining, Chapman&Hall / CRC, Boca Raton, 2009.
- 284. Yakovlenko S. I., Critical electron density in a self-contained copper vapour laser in the restricted pulse repetition rate, Quantum Electron, 30, 6, 501-505, 2000. http://dx.doi.org/10.1070/QE2000v030n06ABEH001751
- 285. Yang, C.-C., Prasher S. O., Lacroix R., Kim S. H. A multivariate adaptive regression splines model for simulation of pesticide transport in soils, Biosystems Engineering, 86(1) 9–15, 2003.
- 286. Yeo I. K., Johnson R. A. A new family of power transformations to improve normality or symmetry. Biometrika 87(4), 954–959, 2000. doi:10.1093/biomet/87.4.954.
- 287. Yu D. L., Wang R. W., Tao Y. X., Physical simulation for large-bore copper vapor laser, Chin. Phys. Lett., 17, (1), 19-21, 2000.
- 288. Yuanyuan C., Runhe S., Shijie S., Wei G. Ensemble and enhanced PM10 concentration forecast model based on stepwise regression and wavelet analysis, Atmos Environ, 74, 346–359, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.002.
- 289. Zhang S., Hu X., New Microwave Diagnostic Theory for Measurement of Electron Density in Atmospheric Plasmas, Chin Phys Lett, 22(1)168-170, 2005.
- 290. Zhao J. Y., Zhu Y.-P., Zhang M.-B., Bertolatti D. An Application of ARIMA Model to Predict Submicron Particle Concentrations from Meteorological Factors at a Busy Roadside in Hangzhou, China, Sci Tot Environ, 426, 336-345, 2012.
- 291. Zickus M., Greig A. J., Niranjan M. Comparison of Four Machine Learning Methods for Predicting PM10 Concentrations in Helsinki, Finland. Water, Air, and Soil Pollution: Focus 2, 717-729, 2002. doi: 10.1023/A:1021321820639.
- 292. Zou H., Hastie T. Regularization and variable selection via the elastic net, J Royal Stat Soc B 67, 301-320, 2005. Wiley.
- 293. Zureng X., Guiyan Z., Fucheng L. Applications of the CuBr vapor laser as an image-brightness amplifier in high-speed photography and photomicrography, Appl Opt, 31, 3395-3397, 1992.
- 294. Zwozdziak A., Samek L., Sowka I., Furman L., Skretowicz M. Aerosol pollution from small combustors in a village. Sci World J, 2012, Article ID 956401, 2012. doi:10.1100/2012/956401.
- 295. Батенин В. М., Бохан П. А., Бучанов В. В., Евтушенко Г. С., Казарян М. А., Климовский И. И., Карпухин В. Т., Маликов М. М., Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. Том 2, Изд. Физматлит, 2011. <u>http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_71782</u>
- 296. Бойченко А. М., Моделирование лазеров и ламп на переходах эксиплексных и эксимерных молекул и лазеров на парах меди с модифицированной кинетикой (по материалам докторской диссертации), ИОФ РАН, Москва, 2005, 45 с.
- 297. Букшпун Л. М., Е. Л. Латуш, М. Ф. Сэм, Влияние температуры активной среды на характеристики генерации рекомбинационного Sr-He-лазера, Квант. электрон., 15(9) 1762–1764, 1988.
- 298. Вагарфик Н. Б., Филиппов Л. П., Тарзиманов А. А., Тоцкий Е. Е., Справочник по теплопроводности жидкостей и газов, Энерготомиздат, Москва, 1990.
- 299. Гочева-Илиева С. Г. Приложна математика, Университетско издателство "Паисий Хилендарски" (електронно издание), 2013. <u>http://fmi.uni-plovdiv.bg/gocheva/PM-lekcii.pdf</u>
- 300. Гочева-Илиева С. Г., Илиев И. П., Параметрични модели на характеристиките на лазер с пари на меден бромид. Университетско издателство "Паисий Хилендарски", Пловдив, 2010.

- 301. Градобоев Ю. Г., Гуляев Ю. В., Казарян М. А., Кружалов С. В., Лябин Н. А., Мокрушин Ю. М., Шакин О. В. Источник УФ излучения на базе лазера на парах меди с акустооптическим управлением спектральными и временными характеристиками, Квант. электрон. 34(12) 1133–1137, 2004.
- 302. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установовшийся ток. Москва: Наука, 1971. с. 73-74.
- 303. Жданеев О. В., Моделирование процессов в лазерах на парах меди с модифицированной кинетикой, Кандидатская дисертация, Томск, ИОФ СО РАН, М., 2004, 231 с.
- 304. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев, Наукова думка, 1982.
- 305. Качество на атмосферния въздух, Нормативни актове. Министерство на околната среда и водите, <u>http://www.moew.government.bg/?show=top&cid=119</u>
- 306. Лисовский В. А. Критерий пробоя газа в СВЧ поле. Журнал Технической физики, 69(11) 25-29, 1999.
- 307. Лисовский В. А., Яковин С.Д. Модифицированный закон Пашена для зажигания тлеющего разряда в инертных газах. Журнал Технической физики, 70(6), 58-62, 2000.
- 308. Магнус Я. Р., Катышев П. К., Пересецкий А. А. Эконометрика. Начальный курс, 8 изд. Москва, Дело, 2007.
- 309. Опрев М., Батов С., Узунов Д. Топлотехника. 3 изд. Техника, София, 1978.
- 310. Програма за намаляване на нивата на замърсителите в атмосферния въздух и достигане на установените норми за вредните емисии в град Благоевград. http://eea.government.bg/bg/prev_nsmos/air/roukav/obshtini3/blagoevgrad.pdf
- 311. Програма за намаляване на нивата на замърсителите в атмосферния въздух и достигане на установените норми за вредните емисии в град Кърджали. <u>http://eea.government.bg/bg/prev_nsmos/air/roukav/obshtini2/KAV-Kurdjali.doc</u>
- 312. Програма за намаляване на нивата на замърсителите в атмосферния въздух и достигане на установените норми за вредните емисии в град Шумен. <u>http://eea.government.bg/bg/prev_nsmos/air/roukav/obshtini2/KAV-Shumen.doc</u>
- 313. Сендов Б., Попов В. Числени методи, т. II., София, Наука и изкуство, 1978.
- 314. Таблицы физических величин, ред. Кикоин И.К., Москва, Атомиздат, 1976.
- 315. Физические величины, Справочник, ред. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Москва, Энергоатомиздат, 1991.
- 316. Чеботарев Г. Д., Латуш Е. Л., Пруцаков О. О., Фесенко А. А. Кинетика активной среды рекомбинационного He-Sr+-лазера. 1. Пространственно-временные характеристики. Квант. Электр., 38(4) 299-308, 2008.
- 317. Чеботарев Г. Д., Латуш Е. Л., Фесенко А. А. Кинетика активной среды рекомбинационного He-Sr+-лазера. 2. Достижимые энергетические характеристики. Квант. Электр., 38(4) 309-318, 2008.
- 318. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, серия Б, Том XI-4: Газовые и плазменные лазеры, ред. Яковленко С. И., Физматлит, Москва, 2005.