

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

кафедра фізичної електроніки

До захисту допущено:

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Анатолій ВЕКЛИЧ

«\_23\_» травня 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

на тему:

«Дослідження термічної багатокомпонентної плазми дугового розряду між плавкими електродами»

**Виконав:**

студент 2-го курсу магістратури  
денної форми навчання  
спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали  
ОП «Прикладна фізика та наноматеріали»  
Картель Максим Олегович

\_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

д.ф.-м.н., проф. Веклич Анатолій Миколайович  
ас. Мурманцев Олександр Олександрович

\_\_\_\_\_

**Рецензент:**

канд.т.н., с.н.с. Толочин Олександр Іванович

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_

Робота допущена до захисту в ЕК рішенням кафедри фізичної електроніки  
від «17» травня 2023 р., протокол № 31.

Завідувач кафедри фізичної електроніки,  
доктор фіз.-мат. наук, професор  
Веклич Анатолій Миколайович

\_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Робота вміщує 19 стор., 2 рис., 31 джерело

ОПТИЧНА АБСОРБЦІЙНА ТА ЕМІСІЙНА СПЕКТРОСКОПІЯ, ПЛАЗМА ДУГОВОГО РОЗРЯДУ, КОМПЗИТНІ МАТЕРІАЛИ, ЕЛЕКТРИЧНИЙ КОНТАКТ.

У цій роботі було порівняно дослідження по темі термічної багатоконпонентної плазми дугового розряду між плавкими електродами із різними технологіями виготовлення електродів, їх компонентного складу.

Опрацьовано методи експериментальних досліджень плазми електродугових розрядів. А саме, методами оптичної емісійної спектроскопії та лазерної адсорбційної спектроскопії.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>4</b>
<b>1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	<b>6</b>
<b>2. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ РОЗРЯДІВ</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1. Дослідження компонентного складу плазми та вмісту парів металів методами оптичної емісійної спектроскопії (ОЕС)</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2 Визначення концентрації атомів міді в плазмі методом лазерної адсорбційної спектроскопії (ЛАС)</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2 Метод Левенберга — Марквардта</b> .....	<b>12</b>
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>15</b>
<b>ДЖЕРЕЛА</b> .....	<b>16</b>

## ВСТУП

Композитні матеріали на основі міді набули широкого застосування в якості матеріалів для електродів та контактів комутуючих приладів електротехнічного призначення (реле, комутатори, розмикачі тощо). Ефективність роботи таких пристроїв визначається ерозійною стійкістю електродного матеріалу і, отже, особливістю процесів переносу маси цього матеріалу у розрядному проміжку. Необхідно зазначити, що кількість парів електродного походження в розряді, який виникає при процесах комутації, залежить як від структури та складу електродів, так і від параметрів плазми [1, 2]. Саме тому дослідження параметрів такої плазми представляє інтерес для оптимізації складу та технології виготовлення композиційних матеріалів.

Найчастіше для виготовлення композиційних матеріалів застосовують методи порошкової металургії [3]: твердофазне спікання, що чергується з допресуванням; рідиннофазне спікання та капілярне просочування в поєднанні з додатковими методами обробки (термічна, обробка тиском, ультразвукова тощо). Композиційні матеріали на основі міді та срібла, які зміцнені оксидами, одержують також методами внутрішнього окиснення.

На сьогодні альтернативним методом одержання контактних композиційних матеріалів є електронно-променеве випаровування металевих і неметалевих матеріалів у вакуумі.

На сьогоднішній день, проблеми розробки новітніх композитних матеріалів, покращення характеристик вже існуючих та оптимізація їх технологій виробництва є актуальними у зв'язку з постійним розвитком галузі електроенергетики. Особливий інтерес викликають композитні матеріали на основі суміші міді та хрому, в яких гарна електро- і теплопровідність міді та тугоплавкість хрому відіграють визначальну роль в

стійкості до термічної дії плазми електродугового розряду, який виникає під час перемикання контактів.

Композити Cu-Cr вже давно використовуються як електродні матеріали в вакуумних дугогасних камерах середньої/високої потужності [4], в різних приладах для електроерозійної обробки [5, 6], в залізничній системі електропоїздів [7], в тролейбусних дротах [8] тощо.

Крім того, хром має гарні гетерогенні властивості, які запобігають надмірному утворенню летких поверхневих оксидів в порах матеріалу контактів комутуючих пристроїв. Все це робить композитні матеріали Cu-Cr незамінними при використанні у широкому спектрі комутаційних елементів та пристроїв електроенергетики.

## 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Нині композити Cu–Cr представляють великий інтерес в електроенергетиці як контактні матеріали через їх низьку схильність до зварювання, високу міцність, хорошу вакуумно-геттерну властивість, що визначається вмістом хрому, тощо. Різні технології виготовлення та/або умови існуючих методів виробництва застосовуються для найкращого відповідності характеристик матеріалів промисловим вимогам. В даний час різні методи виробництва Cu–Cr, такі як вакуумне лиття [9], дугове плавлення [10], механічне або поверхневе легування [11,12], електронні обробка пучком [13], порошкова металургія [14] тощо є найбільш широко використовуваними. За останнє десятиліття було запропоновано декілька сучасних технологій виготовлення Cu–Cr композитів, які потребують апробації в реальних умовах експлуатації.

У статті [15] запропонували метод у поєднанні з механічним помелом і механічним легуванням для приготування нанокристалічного Cu–Cr перенасиченого твердого розчину з комерційно доступних порошків. Цей метод дозволив авторам отримати більш дрібні порошки сплаву вищий вихід порошку, вужчий діапазон розподілу за розмірами, менший розмір кристалітів і вище розчинення хрому. Такі результати являють собою привабливий потенціал для технологічних застосувань. З метою покращення механічних властивостей, а також зносостійкості металоматричних композитів [16] до композиції Cu–Cr додавали домішку SiC. Таким чином, авторам вдалося досягти відносно менших кумулятивних втрат об'єму при сухому ковзанні меншу швидкість зношування та коефіцієнт тертя в композиті. У статті [17] запропоновано метод ударного спікання, тобто спікання з одночасним пресуванням під високим тиском. Встановлено, що механічні властивості (міцність і твердість) таких Cu–Cr композитів

перевершують характеристики сплавів подібного складу, отриманих промисловими методами просочення (інфільтрації) та електродугового переплаву. Очевидно, що матеріали, виготовлені за такою новою технікою, в інших умовах або з іншими технологічними параметрами, повинні бути проведені перед їх широким впровадженням у реальні пристрої. Як бачимо, таким новим Cu–Cr композиційним матеріалам було присвячено багато робіт. Але ці роботи були зосереджені переважно на дослідженні механічних або структурних параметрів таких матеріалів. Водночас недостатньо робіт, спрямованих на дослідження взаємодії плазми з такими контактними матеріалами.

Композитні матеріали Cu-Cr, виготовлені за технологіями спікання та/або інфільтрації, як правило, характеризуються невеликою залишковою пористістю, наявність якої, в свою чергу, може призвести до затримки переривання при високих напругах. В деяких застосуваннях це може негативно вплинути на розривну здатність комутаційних пристроїв. Подальше пресування після спікання може знизити пористість [6, 18], що, в свою чергу, може покращити електро- та теплопровідність. Крім того, зниження пористості можна досягнути також і підвищенням температури спікання [19].

На жаль, саме цей параметр (температура спікання) технологічного процесу виготовлення таких композитних матеріалів, який, насправді, може вплинути на їх експлуатаційні характеристики, ще недостатньо досліджений.

Варто зазначити, що вплив температури спікання досліджено в представлених роботах нашої лабораторії [20-22]. А саме було показано, що електродні матеріали, спечені при температурі 1050 °С, мають кращу ерозійну стійкість порівняно з тими, які спікалися при 750 °С. Але, слід зазначити, дослідження залежності поведінки ерозійної стійкості у згаданому діапазоні температури спікання ще не завершено. Крім того, в роботах представлені результати досліджень плазми електродугових розрядів силою

струму 3.5 та 30 А, а діагностика плазми таких розрядів силою струму вище, ніж названі, ще не проводилась.

Тому, метою цієї роботи буде дослідження та порівняння ерозійної стійкості композитних матеріалів Cu-Cr, виготовлених при різних температурах спікання, в умовах термічної дії плазми електродугових розрядів методами оптичної емісійної та лазерної абсорбційної спектроскопії. Для визначення характеру ерозії окремих компонент композиту буде досліджено поведінку електродугового розряду як між композитними Cu-Cr електродами, так і між однокомпонентними мідними електродами. Порівняння композитів, виготовлених при різних температурах спікання, проводиться за оцінкою складу плазми та вмісту парів металів, які потрапляють в розрядний проміжок внаслідок взаємодії термічної плазми електродугового розряду з поверхнею електродів. А саме, для дослідження вмісту парів металів в розрядному проміжку між композитними Cu-Cr електродами залучали методи оптичної спектроскопії (ОЕС та ЛАС). Зазначений вміст парів металів розраховувався у припущенні ЛТР на основі таких експериментально визначених параметрів, як температура, електронна концентрація та оптична товщина плазми. Зокрема, температура плазми визначена методом діаграм Больцмана, а електронна концентрація визначена з ширини спектральних ліній міді. Значення оптичної товщини плазми дозволяє розрахувати концентрацію атомів міді в розрядному проміжку.

## 2. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ РОЗРЯДІВ

### 2.1. Дослідження компонентного складу плазми та вмісту парів металів методами оптичної емісійної спектроскопії (ОЕС)

Радіальні розподіли компонентного складу плазми та вмісту парів металів в плазмі електродугового розряду розраховується на основі попередньо експериментально визначених параметрів плазми, а саме, радіальних розподілів температури плазми та електронної концентрації.

Радіальний розподіл температури розраховується методом діаграм Больцмана на основі експериментально одержаних значень інтенсивності випромінювання спектральних ліній із залученням спектроскопічних констант, селекція яких виконана в роботах [23, 24].

Для реєстрації інтенсивності випромінювання використовується експериментальна установка, оптична схема якої зображена на Рис. 2.1

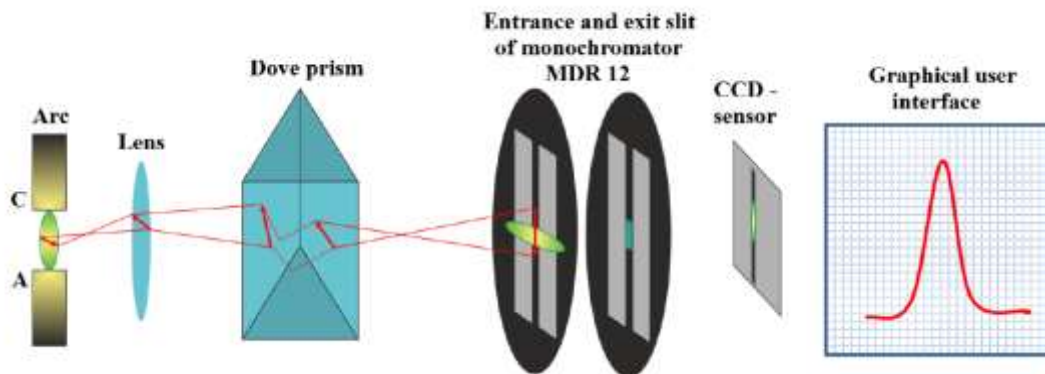


Рисунок 2.1 – Оптична схема експериментальної установки для реєстрації радіального розподілу інтенсивності випромінювання спектральних ліній в плазмі електродугового розряду

Радіальні розподіли електронної концентрації визначаються з електропровідності, яка розраховується шляхом розв'язання рівняння енергетичного балансу (Еленбааса-Хеллера) у наближенні ЛТР плазми.

На наступному етапі, на основі радіальних розподілів температури плазми та електронної концентрації, розраховується у припущенні ЛТР відповідні просторові розподіли компонентного складу плазми та вмісту парів металів.

Алгоритм розрахунку, а також детальний опис експериментальних вимірювань представлені в роботах [14, 20].

## 2.2 Визначення концентрації атомів міді в плазмі методом лазерної адсорбційної спектроскопії (ЛАС)

В основі методів адсорбційної спектроскопії плазми лежить залежність поглинання випромінювання від параметрів плазмового об'єкту, зокрема, від концентрації поглинаючих частинок. Висока монохроматичність лазерного випромінювання забезпечує спектральну селективність поглинання в плазмовому об'єкті, що дозволяє визначити концентрацію поглинаючих частинок певного типу. Особливість використаного в рамках даної роботи методу лазерної адсорбційної спектроскопії полягає в можливості одночасного визначення просторового розподілу заселеності енергетичного рівня атомів міді.

Зокрема, зазначений метод реалізований в експериментальній установці, де плазма електродугового розряду зондувалась лазерним випромінюванням з довжиною хвилі Cu I 510.5 нм (див. Рис. 2.2). Ступінь поглинання (оптична товщина) такого випромінювання в плазмі визначається заселеністю  $2D_{5/2}$  енергетичного рівня атома міді [25].

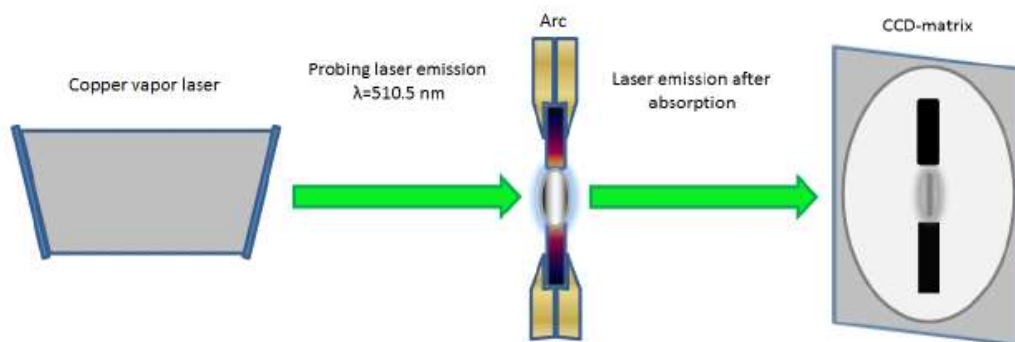


Рисунок 2.2 – Схема експериментальної установки для визначення просторового розподілу парів міді методом лазерної абсорбційної спектроскопії

Як джерело зонduючого випромінювання використовувався лазер на парах міді "Кріостат 1", який працює в імпульсному режимі (тривалість імпульсу 10 нс, частота повторення 10 кГц). Оскільки діаметр лазерного пучка перевищує розміри плазмового об'єкта, можна зареєструвати розподіл поглинання (оптичної товщини) в плазмі в кожній точці розрядного проміжку.

### 2.3 Метод Левенберга — Марквардта

У математиці та обчислювальній техніці алгоритм Левенберга-Марквардта (Levenberg–Marquardt algorithm, LMA або просто LM), також відомий як метод найменших квадратів з демпфуванням (damped least-squares, DLS), використовується для розв'язання нелінійних задач найменших квадратів. Такі задачі мінімізації виникають, зокрема, при підборі кривої за методом найменших квадратів. МНК інтерполює між алгоритмом Гауса-Ньютона (Gauss–Newton algorithm, GNA) та методом градієнтного спуску. LMA є більш надійним, ніж GNA, а це означає, що в багатьох випадках він знаходить розв'язок, навіть якщо починається дуже далеко від кінцевого мінімуму. Для добре керованих функцій і розумних початкових параметрів LMA має тенденцію бути повільнішим за GNA. LMA також можна розглядати як Гаусса-Ньютона з використанням підходу довірчої області.

Алгоритм був вперше опублікований у 1944 році Кеннетом Левенбергом [26]. під час роботи у Франкфуртському армійському арсеналі. Він був перевідкритий у 1963 році Дональдом Марквардтом [27], який працював статистиком у DuPont, та незалежно Жираром [28], Вінном [29] і Моррісоном [30].

LMA використовується в багатьох програмних додатках для розв'язання загальних задач підбору кривих. Використовуючи алгоритм Гауса-Ньютона, він часто збігається швидше, ніж методи першого порядку [31] Однак, як і інші ітераційні алгоритми оптимізації, LMA знаходить лише локальний мінімум, який не обов'язково є глобальним мінімумом.

Основне застосування алгоритму Левенберга-Марквардта полягає в задачі підбору кривої за методом найменших квадратів: маючи набір з  $m$  емпіричних пар  $(x_i, y_i)$  незалежних і залежних змінних, знайти параметри  $\beta$  модельної кривої  $f(x, \beta)$  таким чином, щоб сума квадратів відхилень  $S(\beta)$  була мінімальною:

$\hat{\beta} \in \operatorname{argmin}_{\beta} S(\beta) \equiv \operatorname{argmin}_{\beta} \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, \beta)]^2$  , які вважаються непорожніми.

Саме цей алгоритм був вибраний для вирішення системи нелінійних рівнянь для знаходження невідомих параметрів системи.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Дослідження характеру ерозії композитних Cu-Cr матеріалів в умовах термічної дії плазми електродугових квазістаціонарних розрядів

## ВИСНОВКИ

Під час даної роботи було опрацьовано дослідження по темі термічної багатокomпонентної плазми дугового розряду між плавкими електродами із різними технологіями виготовлення електродів, їх компонентного складу.

Було опрацьовано методи експериментальних досліджень плазми електродугових розрядів. А саме, методами оптичної емісійної спектроскопії та лазерної адсорбційної спектроскопії.

## ДЖЕРЕЛА

1. Cheminat B., Gadaud R. et Andanson P. Vaporisation d'une anode en argent dans le plasma d'un arc électrique // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 1987. — 20. — P. 444—452.
2. Maouhoub E. Influence of carbon dioxide on the radial temperature distribution in an argon arc // *J. Plasma Physics.* — 2000. — 63, Part 2. — P. 97—114.
3. Гречанюк Н. І., Осокін В. А., Афанасьєв І. Б., Гречанюк І. Н. Електронно-променева технологія отримання матеріалів для електричних контактів // *Електричні контакти та електроди.* - К.: Ін-т пробл. матеріалознавства НАН України, 1998. - С. 51-66.
4. Slade P.G. *Electrical Contacts, Principles and Applications* / P.G. Slade – CRC Press, 2014. – 1311 p.
5. Gülcan O. Performance and surface alloying characteristics of Cu–Cr and Cu–Mo powder metal tool electrodes in electrical discharge machining / O. Gülcan, İ. Uslan, Y. Usta, C. Çoğun // *Machining Science and Technology.* – 2016. – P. 523-546.
6. Mingrang C. Mechanism and Experimental Research on Small-Hole EDM with Cu-Cr Composite / C. Mingrang, H. Yuefeng, C. Yilong, Y. Shengqiang // *Electrode. Sensors and Transducers.* – 2014. V. 174. – P. 268-272.
7. Wu N.P., *Electric Material Science* / N.P. Wu – Mechanical Industry Press, Beijing, 1993, P. 24–45.
8. Masuda C. Fatigue properties of Cu–Cr in situ composite / C. Masuda, Y. Tanaka. // *International Journal of Fatigue.* – 2006. V. 28. – P. 1426-1434
9. Miao, B., Zhang, Y., Zhao, Y., & Liu, G. 2000, Proc. IEEE 19'th Int. Symp. Disch. Electr. Insul. Vacuum, 729–732.
10. Muller, R. 1988, Siemens Forsch.-u Entwick1.-Ber.Bd, 17, 105.

11. Gerasimov, K., Mytnichenko, S., Pavlov, S., Chernov, V., & Nikitenko, S. 1997, *J. Alloys Compd.*, 252, 179.
12. Gülcan, O., Uslan, I., Usta, Y., & Çoşgun, C. 2016, *Mach. Sci. Technol.*, 20(4), 523.
13. Zhao, Z., Chai, L., Xiao, Z., Tu, J., Wang, Y., & Huang, W. 2015, *Trans. Nonferrous Met. Soc. Chin.*, 25, 1935.
14. Božić, D., Ružić, J., Stašić, J., & Rajković, V. 2014, *Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.)*, 105(2), 194.
15. Fang, Q., & Kang, Z. 2015, *Powder Technol.*, 270, 104.
16. Gautam, R., Ray, S., Jain, S., & Sharma, S. 2008, *Wear*, 265, 902.
17. Tolochyn, A., Laptev, A., & Khomenko, E. 2014, *Electrical Cont. Electr. IPM NAS Ukraine*, 9, 66.
18. A. Papillon, J. Missiaen, J. Chaix, S. Roure, H. Schellekens. Sintering mechanisms of Cu-Cr metallic composites // *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2016, V. 65, P. 9–13.
19. Ерозійні властивості нових композиційних матеріалів Cu-Cr для електроенергетики: звіт про НДР (заключ.) / Київський національний університет імені Тараса Шевченка (КНУ ім. Тараса Шевченка); Керівник А. Веклич № 0119U001854. – К., 2019.-60 с.
20. Murmantsev A.A. Laser absorption spectroscopy of thermal plasma with copper vapours / A.A. Murmantsev, A.N. Veklich, M.M. Kleshych, S.A. Fesenko, V.F. Boretskij, A.I. Ivanisik, M. Bartlova // XVI International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics», November 18-21, 2020, Kyiv, Ukraine.- P. 46-48.
21. Murmantsev A. Plasma-surface interaction of electric arc discharge between composite Cu-Cr electrodes / A. Murmantsev, A. Veklich, V. Boretskij, M. Bartlová, L. Dostál, J. Píška, D. Šimek, A. Gajdos, A. Tolochyn // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2020. – № 6 (130). – P. 174-178.

22. Veklich A. Spectroscopy of Thermal Plasma of Electric Arc Discharge between Consumable Cu-Cr Composite Electrodes / A. Veklich, M. Kleshych, A. Murmantsev, S. Fesenko, V. Boretskij, O. Tolochyn // XV Conference of Electronics and Applied Physics, 2019. - P. 87-89.

23. I.L. Babich, V.F. Boretskij, A.N. Veklich, R.V. Semenyshyn. Spectroscopic data and Stark Broadening of Cu I and Ag I spectral lines: selection and analysis // *Advances in Space Research*. 2014, V.54, P. 1254–1263.

24. Veklich A.N. Spectroscopy Data of W I, Mo I and Cr I Spectral Lines: Selection and Analysis / A.N. Veklich, A.V. Lebid, T.A. Tmenova // *Journal of Astrophysics and Astronomy*. – 2015. V. 36(4). – P. 589-604.

25. Semenyshyn R. Spectroscopy Peculiarities of Thermal Plasma of Electric Arc Discharge Between Electrodes With Zn Admixtures / R.V. Semenyshyn , A.N. Veklich, I.L. Babich, V.F. Boretskij // *Advances in Space Research*. – 2014. V. 54. – P 1235-1241.

26. Levenberg, Kenneth (1944). "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares". *Quarterly of Applied Mathematics*. 2 (2): 164–168. doi:10.1090/qam/10666.

27. Marquardt, Donald (1963). "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters". *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 11 (2): 431–441. doi:10.1137/0111030. hdl:10338.dmlcz/104299.

28. Girard, André (1958). "Excerpt from *Revue d'optique théorique et instrumentale*". *Rev. Opt.* 37: 225–241, 397–424.

29. Wynne, C. G. (1959). "Lens Designing by Electronic Digital Computer: I". *Proc. Phys. Soc. Lond.* 73 (5): 777–787. Bibcode:1959PPS....73..777W. doi:10.1088/0370-1328/73/5/310.

30. Morrison, David D. (1960). "Methods for nonlinear least squares problems and convergence proofs". *Proceedings of the Jet Propulsion Laboratory Seminar on Tracking Programs and Orbit Determination*: 1–9.

31. Wiliamowski, Bogdan; Yu, Hao (June 2010). "Improved Computation for Levenberg–Marquardt Training" (PDF). *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 21 (6).