

Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ОЛІХ ОЛЕГ ЯРОСЛАВОВИЧ**

УДК 534.29, 537.312.5/.6/.9

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **АКУСТО–ІНДУКОВАНІ ЕФЕКТИ В ОПРОМІНЕНИХ ТА НЕОПРОМІНЕНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУРАХ**

Спеціальність 104— «Фізика та астрономія»  
10— Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня *доктора фізико-математичних наук*

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ О. Я. Оліх

Науковий консультант Іванов Іван Іванович

доктор фізико–математичних наук, професор

Київ — 2018

## АНОТАЦІЯ

Оліх О. Я. Акусто–індуковані ефекти в опромінених та неопромінених напівпровідникових структурах. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» (10 – Природничі науки). - Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2018.

### Зміст анотації

Ключові слова: ультразвук, гамма-опромінення, кремній, бар'єрні структури, акусто–дефектна взаємодія, перенесення заряду, оборотні зміни.

### Список публікацій здобувача

## ABSTRACT

Olikh O. Ya. Акусто–індуковані ефекти в опромінених та неопромінених напівпровідникових структурах. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» (10 – Природничі науки). - Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2018.

### Зміст анотації

Ключові слова: ultrasound, gamma-rays, silicon, barrier structures, acousto-defect interaction, charge transport, reversible change.

### Список публікацій здобувача

## Зміст

	Стр.
<b>Перелік умовних скорочень та позначень . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>Вступ . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>Розділ 1. Акусто–індуковані ефекти у мікроелектронних структурах та матеріалах . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1 Залишкові акусто–індуковані ефекти . . . . .	9
1.2 Динамічні акусто–індуковані ефекти . . . . .	9
<b>Розділ 2. Особливості експериментальних методик . . . . .</b>	<b>10</b>
2.1 Дослідні структури . . . . .	10
2.1.1 Структури метал–напівпровідник на основі кремнію . . . . .	10
2.1.2 Структури метал–напівпровідник на основі арсеніду галію . . . . .	12
2.1.3 Кремнієві сонячні елементи . . . . .	12
2.1.4 Монокристалічні структури арсеніду галію . . . . .	12
2.1.5 Монокристали карбіду кремнію . . . . .	12
2.2 Використання активного ультразвуку . . . . .	12
2.3 Радіаційні обробки . . . . .	12
2.3.1 Нейтронне опромінення . . . . .	12
2.3.2 Опромінення $\gamma$ –квантами . . . . .	12
2.3.3 Мікрохвильове опромінення . . . . .	12
<b>Розділ 3. Визначення параметрів структур метал–напівпровідник . . . . .</b>	<b>13</b>
3.1 Загальні підходи до визначення параметрів діодів Шотки . . . . .	13
3.2 Контрольні вольт–амперні характеристики . . . . .	15
3.2.1 Ідеальні синтезовані ВАХ . . . . .	15
3.2.2 Синтезовані ВАХ з випадковими похибками . . . . .	16
3.2.3 Експериментальні ВАХ . . . . .	17
3.3 Критерії точності методів . . . . .	18

	Стр.
3.4 Методи визначення параметрів ДШ . . . . .	18
3.4.1 Аналітичні методи . . . . .	18
3.4.2 Чисельні методи . . . . .	28
3.4.3 Еволюційні алгоритми . . . . .	30
3.5 Порівняння ефективності методів визначення параметрів структур МН . . . . .	35
3.5.1 Точність визначення параметрів на основі ідеальних ВАХ .	35
3.5.2 Швидкодія методів визначення параметрів ДШ . . . . .	43
3.5.3 Вплив випадкових похибок на точність визначення параметрів структур МН . . . . .	43
3.5.4 Визначення параметрів реальних структур МН . . . . .	43
Висновки до розділу 3 . . . . .	43
<b>Розділ 4. Оформление различных элементов . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1 Форматирование текста . . . . .	49
4.2 Ссылки . . . . .	49

## Перелік умовних скорочень та позначень

DE	differential evolution, метод диференційної еволюції
MABC	modified artificial bee colony, метод модифікованої штучної бджолої сім'ї
PSO	particle swarm optimization, метод оптимізації зграї частинок
TLBO	teaching learning based optimization, метод оптимізованого викладання та навчання
AI	акусто–індуковані
AX	акустичні хвилі
BAХ	вольт–амперна характеристика
ВБШ	висота бар'єру Шотки
ВФХ	вольт–фарадна характеристика
ДШ	діод Шотки
ЕА	еволюційний алгоритм
КСЕ	кремнієвий сонячний елемент
МН	метал–напівпровідник
ОПЗ	область просторового заряду
УЗ	ультразвук
УЗН	ультразвукове навантаження
УЗО	ультразвукова обробка
$\xi_{us}$	амплітуда деформації ґратки при поширенні УЗ
$\tau_g$	ефективний час життя неосновних носіїв заряду в ОПЗ
$\tau_n$	ефективний час життя електронів
$\Phi_b$	ВБШ при нульовому зміщенні
$A$	площа зразка
$A^*$	ефективна стала Річардсона
$E_g$	ширина забороненої зони
$FF$	фактор форми освітленої ВАХ СЕ
$f_{us}$	частота УЗ
$q$	елементарний заряд
$I$	струм

$I_{ph}$	фотогенерований струм
$I_s$	струм насичення
$I_s$	струм короткого замикання
$k$	стала Больцмана
$L_n$	довжина дифузії електронів
$N_c$	ефективна густина станів біля дна зони провідності
$N_v$	ефективна густина станів біля вершини валентної зони
$n_i$	концентрація власних носіїв заряду
$n_{id}$	фактор неідеальності
$n_n$	концентрація основних носіїв у електронному напівпровіднику
$n_p$	концентрація неосновних носіїв у дірковому напівпровіднику
$p_n$	концентрація неосновних носіїв у електронному напівпровіднику
$p_p$	концентрація основних носіїв у дірковому напівпровіднику
$R_s$	послідовний опір
$R_{sh}$	шунтуючий опір
$T$	абсолютна температура
$u_{us}$	амплітуда зміщень атомів при поширенні УЗ
$V$	напруга
$V_d$	падіння напруги в околі бар'ру
$V_{oc}$	напруга холостого ходу
$V_R$	зворотна напруга
$W_{us}$	інтенсивність акустичної хвилі

## Вступ

обґрунтування вибору теми дослідження (висвітлюється зв'язок теми дисертації із сучасними дослідженнями у відповідній галузі знань шляхом критичного аналізу з визначенням сутності наукової проблеми або завдання);

мета і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження;

методи дослідження (перераховуються використані наукові методи дослідження та змістовно відзначається, що саме досліджувалось кожним методом; обґрунтовується вибір методів, що забезпечують достовірність отриманих результатів та висновків);

наукова новизна отриманих результатів (аргументовано, коротко та чітко представляються основні наукові положення, які виносяться на захист, із зазначенням відмінності одержаних результатів від відомих раніше);

особистий внесок здобувача (якщо у дисертації використано ідеї або розробки, що належать співавторам, разом з якими здобувачем опубліковано наукові праці, обов'язково зазначається конкретний особистий внесок здобувача в такі праці або розробки; здобувач має також додати посилання на дисертації співавторів, у яких було використано результати спільних робіт);

апробація матеріалів дисертації (зазначаються назви конференції, конгресу, симпозіуму, семінару, школи, місце та дата проведення);

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальних обсяг дисертації складає ??TotPages сторінки з 15 рисунками та 2 таблицями. Список використаних джерел містить 0 найменувань.

За наявності у вступі можуть також вказуватися:

зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами - вказується, в рамках яких програм, тематичних планів, наукових тематик і грантів, зокрема галузевих, державних та/або міжнародних, виконувалося дисертаційне дослідження, із зазначенням номерів державної реєстрації науково-дослідних



робіт і найменуванням організації, де виконувалася робота; практичне значення отриманих результатів - надаються відомості про використання результатів досліджень або рекомендації щодо їх практичного використання.

## **Розділ 1. Акусто–індуковані ефекти у мікроелектронних структурах та матеріалах**

### **1.1 Залишкові акусто–індуковані ефекти**

### **1.2 Динамічні акусто–індуковані ефекти**

## Розділ 2. Особливості експериментальних методик

Різноманітні експериментальні дослідження, результати яких представлені у різних наступних розділах, нерідко проводились з використанням однакових напівпровідникових структур. У зв'язку з цим, у даному розділі узагальнено інформацію щодо використаних у дослідженнях структурах, наведено їх властивості та позначення. Представлені описи процедур ультразвукової обробки (УЗО) та ультразвукового навантаження (УЗН), параметри акустичних хвиль, які збуджувалися у зразках. Крім того, наведено характеристики радіаційних обробок, які застосовувалися з метою зміни дефектного складу досліджених напівпровідникових кристалів та структур.

### 2.1 Дослідні структури

#### 2.1.1 Структури метал–напівпровідник на основі кремнію

В дослідженнях використовувалися структури МН (діоди Шотки (ДШ)), виготовлені на основі епітаксійної структури  $n-n^+-\text{Si}$ . Товщини епітаксійного шару та підкладки дорівнювали  $0.2\text{ }\mu\text{m}$  та  $250\text{ }\mu\text{m}$ , відповідно. Епітаксійний шар був легований атомами фосфору, підкладка — сурмою. Для створення бар'єру

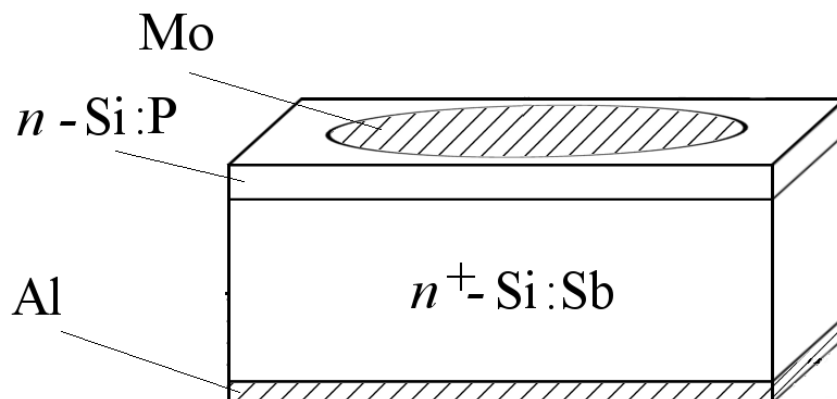


Рис. 2.1 — Структура зразків  $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$ .

Табл. 1 — Параметри структур Мо/ $n-n^+$ -Si.

$N_d, \text{м}^{-3}$	$N_s, \text{м}^{-3}$	$A, \text{м}^2$	Позначення
$(1,1 \div 1,3) \cdot 10^{23}$	$4,2 \cdot 10^{23}$	$3,14 \cdot 10^{-6}$	SSDA
$7,25 \cdot 10^{21}$	$4,2 \cdot 10^{22}$	$49 \cdot 10^{-6}$	SSDB

на поверхню епітаксійного прошарку нанесено шар молібдену. З протилежного боку структури нанесено прошарок алюмінію, який забезпечував наявність омичного контакту. Схематичне зображення структур наведено на Рис. 2.1.

В дисертації представлені результати, отримані з використанням кремнієвих ДШ двох типів, які ідентичних за структурою, проте відрізняються концентраціями носіїв заряду в епітаксійному шарі  $N_d$  та підкладці  $N_s$ , а також площею випрямляючого контакту  $A$ . Для контролю рівня легування були виконані вимірювання вольт-фарадних характеристик (ВФХ) досліджуваних структур при кімнатній температурі ( $T = 295 \text{ К}$ ). Параметри структур, а також їх позначення наведені в Таблиці 1.

## **2.1.2 Структури метал–напівпровідник на основі арсеніду галію**

### **2.1.3 Кремнієві сонячні елементи**

### **2.1.4 Монокристалічні структури арсеніду галію**

### **2.1.5 Монокристали карбіду кремнію**

## **2.2 Використання активного ультразвуку**

## **2.3 Радіаційні обробки**

### **2.3.1 Нейтронне опромінення**

### **2.3.2 Опромінення $\gamma$ –квантами**

### **2.3.3 Мікрохвильове опромінення**

### Розділ 3. Визначення параметрів структур метал–напівпровідник

#### 3.1 Загальні підходи до визначення параметрів діодів Шотки

Напівпровідникові бар'єрні структури, як вже зазначалося раніше, надзвичайно широко застосовуються у техніці. Параметри подібних структур є найбільш суттєвим фактором для можливості практичного використання, а їх визначення відіграє надзвичайну важливу роль під час розробки, проектування та виготовлення пристроїв. Одним з найпоширеніших шляхів визначення параметрів полягає у вимірюванні вольт–амперних характеристик (ВАХ). В цьому випадку взаємозв'язок між струмом та напругою описується за допомогою певних фізичних моделей, в результаті чого з'являється можливість вичленити параметри, спираючись на результати експериментальних вимірювань. Наприклад, пряма гілка ВАХ ДШ згідно з моделлю термoeмісії має описуватися [?] наступними виразами

$$I = I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q(V - IR_s)}{n_{id}kT} \right] - 1 \right\}, \quad (3.1)$$

$$I_s = AA^* T^2 \exp \left( -\frac{q\Phi_b}{kT} \right), \quad (3.2)$$

де  $I_s$  — струм насичення,  $q$  — елементарний заряд,  $R_s$  — послідовний опір,  $n_{id}$  — фактор неідеальності,  $k$  — стала Больцмана,  $T$  — абсолютна температура,  $A$  — площа діоду,  $A^*$  — ефективна стала Річардсона,  $\Phi_b$  — висота бар'єру Шотки (ВБШ) при нульовому зміщенні.  $\Phi_b$  (або  $I_s$ ),  $n_{id}$  та  $R_s$  є найбільш фундаментальними параметрами даної моделі та повинні бути максимально точно визначені з експериментальних ВАХ.

В літературі запропоновано декілька методів визначення параметрів ДШ. Найпростіший стандартний метод вимагає наявності лінійної області на залежності  $\ln(I)$  від  $V$  [?, ?]. В цьому випадку два параметри,  $n_{id}$  та  $\Phi_b$ , можуть бути визначені за кутом нахилу та перетином залежності з віссю струмів, відповідно. На жаль, подібний підхід перестає бути дієздатним у випадку,

коли структура характеризується значним послідовним опором. Зокрема, рівняння (3.1) перетворюється у трансцендентне, що суттєво ускладнює математичні аспекти визначення параметрів. З одного боку, існує цілий набір аналітичних методів екстраполяції параметрів ДШ. Вони базуються на безпосередніх алгебраїчних наближеннях і використовують різноманітні допоміжні функції  $[?, ?, ?, ?, ?, ?, ?, ?, ?]$ , процедури диференціювання  $[?]$  або інтегрування  $[?, ?, ?]$  ВАХ, вимірювання ВАХ при декількох температурах  $[?]$  або з використанням додаткового зовнішнього опору  $[?]$ .

З іншого боку, визначення параметрів є багатовимірною задачею чисельної оптимізації і тому для її вирішення запропоновані різноманітні чисельні методи  $[?, ?, ?, ?]$ . Зазвичай, вони використовують метод найшвидшого градієнтного спуску для мінімізації різниці між виміряними та апроксимуючими значеннями. При цьому деякі автори  $[?, ?]$  шукають розв'язок рівняння (3.1) використовуючи  $W$ -функцію Ламберта  $[?]$ . Зазвичай, чисельні методи характеризуються більш високим рівнем достовірності визначення параметрів, проте нерідко вимагають відносно довгого часу для розрахунку. Крім того, спостерігається тенденція збіжності у локальний екстремум замість глобального.

Нарешті, порівняно нещодавно було запропоновано використовувати еволюційні алгоритми (ЕА) для визначення параметрів напівпровідникових пристроїв  $[?, ?, ?, ?, ?, ?, ?, ?]$ . ЕА це стохастичний метод, який виявляє дуже високу ефективність при оптимізації дійсних цільових функцій багатьох змінних. На відміну від чисельних методів, ЕА може бути застосований до нелінійних функцій без необхідності розрахунку похідних, а також слабо залежить від початкових наближень значень параметрів. ЕА вважаються  $[?]$  найбільш багатобічними методами розрахунку параметрів.

У літературі наявні роботи  $[?, ?, ?]$ , в яких проводиться порівняння та огляд шляхів визначення параметрів ДШ, проте вони переважно зосереджені на розгляді лише декількох метод і фактично не беруть до уваги еволюційні алгоритми. Задача, яка вирішувалась під час досліджень, описаних у даному розділі, полягала у порівнянні ефективності (точності визначення параметрів та швидкості роботи) різних методів визначення параметрів МН-структур з ВАХ. Крім того, розглянуте питання впливу величини окремих параметрів на точність

визначення всього набору. Було розглянуто підгрупу методів, які дозволяють визначити ВБШ, фактор неідеальності та послідовний опір використовуючи лише одну ВАХ. Зокрема, увага сфокусована на 10 аналітичних методах, 2 чисельних методах та 4 еволюційних алгоритмах (диференційної еволюції (DE, differential evolution), оптимізації зграї частинок (PSO, particle swarm optimization), модифікованої штучної бджолиної сім'ї (MABC, modified artificial bee colony) та оптимізованого викладання та навчання (TLBO, teaching learning based optimization)).

Основні результати даного розділу представлені в роботах [?, ?].

### 3.2 Контрольні вольт–амперні характеристики

Досліджені методи були застосовані до наборів ВАХ, отриманих як експериментально, так і синтезованих штучно. В останньому випадку використовувалися як ідеальні характеристики, так і криві з певним рівнем шуму, який віддзеркалював можливість наявності випадкових похибок вимірювань у реальних умовах.

#### 3.2.1 Ідеальні синтезовані ВАХ

Переважаю, для оцінки спроможності визначення параметрів структур МН за допомогою аналітичних [?, ?, ?, ?, ?, ?, ?, ?, ?] та чисельних [?, ?] методів, а також еволюційних алгоритмів [?, ?, ?] використовують структури на основі кремнію. Керуючись таким загальноприйнятим підходом, під час синтезу ВАХ вважалося, що використовуються кремнієвий ДШ. ВАХ були розраховані за допомогою рівняння (3.1), для розв'язку якого застосовувався метод дихотомії [?, с. 158]. При цьому використовувалися значення  $A = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  та  $A^* = 112 \text{ А см}^{-2} \text{ К}^{-2}$  (випадок  $n\text{-Si}$  [?]). Напруга змінювалась з кроком 0,01 В, струм вар'ювався в діапазоні  $10^{-9} \div 10^{-2} \text{ А}$ .



Задача полягала у перевірці ефективності методів при різних значеннях параметрів і тому дані були синтезовані для діапазону температур від 130 до 330 К. В той же час, ми намагались синтезувати ВАХ, які близькі до характеристик реальних діодів. Тому температурні залежності  $\Phi_b$ ,  $n_{id}$  та  $R_s$  були обрані, спираючись на наступні міркування. Як передбачено теорією [?] та спостережено на експерименті [?, ?], для випадку однорідного контакту Шотки ВБШ має зменшуватись з підвищенням температури, причому очікувана залежність подібна до температурної залежності ширини забороненої зони напівпровідника. Тому для апроксимації температурної залежності ВБШ використовувалося рівняння Варшні [?]

$$\Phi_b(T) = \Phi_b(0) - \frac{7.021 \cdot 10^{-4} T^2}{T + 1108}, \quad (3.3)$$

причому вважалося, що ВБШ при нульовій температурі  $\Phi_b(0) = 0,75$  еВ. Температурна залежність фактору неідеальності нерідко описується співвідношенням

$$n_{id} = 1 + \frac{T_0}{T}, \quad (3.4)$$

де величина константи  $T_0$  для випадку кремнію знаходиться в діапазоні  $20 \div 50$  К [?, ?, ?, ?]. Для синтезу ВАХ було використане значення  $T_0 = 35$  К. Температурна залежність послідовного опору може бути описана виразом [?, ?, ?]

$$R_s = R_{s0} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3.5)$$

де  $E_a$  – енергія активації легуючої домішки. В роботі були використані значення  $E_a = 0,044$  еВ (що відповідає домішковому атому фосфору) та  $R_{s0} = 0.25$  Ом.

Як наслідок, набір синтезованих для аналізу ВАХ складався з 21 кривої, які відповідали інтервалу температур  $130 \div 330$  К з кроком 10 К. При цьому  $\Phi_b$ ,  $n_{id}$  змінювались  $R_s$  від 0,740 до 0,697 еВ, від 1,27 до 1,11 та від 12,6 до 1,2 Ом, відповідно.

### 3.2.2 Синтезовані ВАХ з випадковими похибками

Для того, щоб моделювати можливі випадкові похибки, які виникають під час вимірювань, та проаналізувати стійкість методів визначення параметрів до

їх наявності, були також синтезовані набори ВАХ, в яких значення напруги та струму вибиралися з певним рівнем шуму. В цьому випадку напруга  $V_i$  та струм  $I_i$ , які відповідали  $i$ -й точці ВАХ вибиралися випадковим чином використовуючи розподіл Гауса. Тобто, густина ймовірності очікування певної величини напруги описувалася виразом

$$f(V_i, \bar{V}_i, \sigma_V) = \frac{1}{\sigma_V \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(V_i - \bar{V}_i)^2}{2\sigma_V^2} \right]. \quad (3.6)$$

При цьому середнє значення (сподівання) напруги  $\bar{V}_i$  змінювалося з кроком 0,01 В, середнє значення сили струму  $\bar{I}_i$  обчислювалося використовуючи рівняння (3.1) та  $\bar{V}_i$ . Стандартне відхилення (дисперсія) напруги  $\sigma_V$  вибиралася сталою для всього набору (21 криві) ВАХ. Стандартне відхилення сили струму  $\sigma_I$  залежало від величини сили струму  $\sigma_I = \sigma_I^\varepsilon \cdot \bar{I}_i$ , де постійна для набору ВАХ величина  $\sigma_I^\varepsilon$  — відносна дисперсія струму. Такий підхід відповідає достатньо поширеному на практиці випадку, коли відносні похибки вимірювання напруги та струму залишаються сталими для всієї ВАХ. Надалі для позначення синтезованих подібним чином ВАХ буде використовуватися термін "зашумлені синтезовані дані"(noisy synthetic data).

Різні набори синтезованих ВАХ відрізнялися значеннями  $\sigma_V$  та  $\sigma_I^\varepsilon$ . Фактично, для ідеальних синтезованих ВАХ  $\sigma_V = 0$  В and  $\sigma_I^\varepsilon = 0$ .

### 3.2.3 Експериментальні ВАХ

Досліджені методи були застосовані також до експериментально вимірянних ВАХ кремнієвих структур SSDA, описаних в параграфі 2.1.1. Параметри ДШ визначались на основі характеристик, отриманих в інтервалі температур  $130 \div 330$  К, який співпадав з діапазоном синтезованих ВАХ.

### 3.3 Критерії точності методів

У випадку, коли методи застосовувалися для аналізу синтезованих ВАХ, проводилося оцінювання точності визначення параметрів. Зокрема, для кількісної оцінки точності кожного з методів використовувалися наступні величини. Наприклад, оцінювання визначення фактору неідеальності з однієї ВАХ  $\chi_n^q$  здійснювалося за допомогою виразу

$$\chi_n^q = \left( \frac{n_{id,ext} - n_{id,ac}}{n_{id,ac}} \right)^2, \quad (3.7)$$

де  $n_{id,ext}$  — значення, отримане в результаті застосування методу,  $n_{id,ac}$  — точне значення, яке використовувалося під час синтезу ВАХ.

Точність визначення  $n_{id}$  на всьому наборі ВАХ  $\varepsilon_n$  обчислювалася наступним чином:

$$\varepsilon_n = \sqrt[2N_{IV}]{\prod_{i=1}^{N_{IV}} \chi_{n,i}^q}, \quad (3.8)$$

де  $N_{IV}$  — загальна кількість ВАХ у наборі. Зауважимо, що  $\varepsilon_n$  — це квадратних корінь з середньо-геометричного значення  $\chi_n^q$ . Для оцінювання точності визначення ВБШ та послідовного опору з однієї ВАХ використовувалися величини  $\chi_\Phi^q$  та  $\chi_R^q$ , а для набору ВАХ —  $\varepsilon_\Phi$  and  $\varepsilon_R$ , для розрахунку яких використовувалися вирази, аналогічні (3.7) та (3.8), відповідно.

### 3.4 Методи визначення параметрів ДШ

#### 3.4.1 Аналітичні методи

Модифікований метод Норда [?, ?, ?, ?] базується на використанні допоміжної функції

$$F(V) = \frac{V}{\gamma_N} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I(V)}{AA^*T^2} \right), \quad (3.9)$$

де  $\gamma_N$  — довільна константа, яка має бути більша, ніж фактор неідеальності. При цьому величини ВБШ та послідовного опору визначаються за допомогою співвідношень

$$\Phi_b = F(V_{min}) + \frac{\gamma_N - n_{id}}{n_{id}} \left( \frac{V_{min}}{\gamma_N} - \frac{kT}{q} \right), \quad (3.10)$$

$$R_s = \frac{(\gamma_N - n_{id})kT}{qI_{min}}, \quad (3.11)$$

де  $F(V_{min})$  та  $V_{min}$  — це координати точки мінімуму залежності  $F(V)$  від  $V$ ;  $I_{min}$  — струм, який на ВАХ відповідає  $V_{min}$ .

Необхідно підкреслити, що згідно з цим методом, значення  $n_{id}$  має бути відомим. Як наслідок, при застосування метода Норда до синтезованих та експериментальних ВАХ, використовувалися величини  $n_{id,ac}$  та значення, отримане з використанням методу МАВС, відповідно.

Крім того, для випадку  $R_s < 5$  Ом, мінімум функції Норда  $F(V)$ , побудованої на основі ВАХ в діапазоні струмів до  $10^{-2}$  А, не спостерігався взагалі. Тому при застосуванні цього методу, так і методу Бохліна (описаного нижче), використовувалися набори ВАХ, синтезовані в більш широкому струмовому діапазоні, від  $10^{-9}$  до  $10^{-2}$  А.

Нарешті, проведені розрахунки показали, що точність методу Норда залежить від вибраної величини  $\gamma_N$ . Відповідні залежності наведено на Рис. 3.1. Зокрема показано, що похибка визначення  $\Phi_b$  збільшується зі зростанням  $\gamma_N$  як для випадку ідеальних синтезованих ВАХ, так і при використанні зашумлених даних. В той же час, похибка визначення  $R_s$  а) зменшується зі зростанням  $\gamma_N$  при  $\gamma_N < 2$  і залишається сталою при  $\gamma_N > 2,5$  для зашумлених даних; б) немонотонно залежить від  $\gamma_N$  для ідеальних синтезованих ВАХ. Враховуючи виявлені суперечливі тенденції для мінімізації похибки методу Норда при отриманні наведених надалі даних використовувалося значення  $\gamma_N = 1,8$ .

Для позначення результатів, отриманих з використанням методу Норда, використовується мітка «Norde».

J. Werner [?] показав, що за умови коли падіння напруги в області бар'єру  $V_d = (V - IR_s) \gg nkT/q$ , то

$$\frac{(dI/dV)}{I} = \frac{q}{nkT} \left[ 1 - R_s \left( \frac{dI}{dV} \right) \right]. \quad (3.12)$$

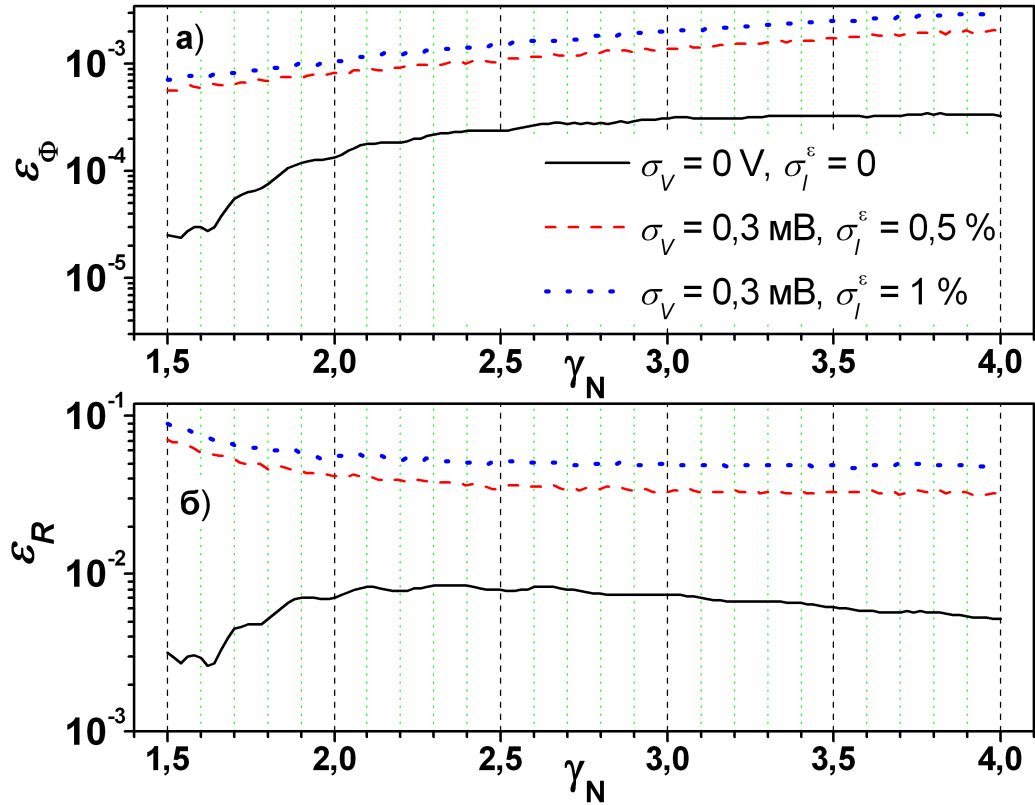


Рис. 3.1 — Залежності точності визначення  $\Phi_b$  (а) та  $R_s$  (б) від величини  $\gamma_N$ .  
при застосуванні метода Норда до набору ідеальних синтезованих ВАХ  
(суцільні лінії) та зашумлених даних (штрихові лінії).

Рівняння (3.12) показує, що графік залежності  $(dI/dV)/I$  від  $(dI/dV)$  має бути прямою лінією, причому її нахил та точка перетину з вертикальною віссю визначаються  $R_s$  and  $n_{id}$ .

На жаль, даний метод дозволяє визначити лише два параметри ДШ. Для оцінки величини ВБШ була використана наступна процедура. Спираючись на визначене значення  $R_s$ , експериментальна або синтезована ВАХ корелювалася і проводилася побудова залежності  $\ln I$  від  $V_d$ . Після цього проводилася апроксимація отриманої залежності лінійною функцією за методом найменших квадратів [?, с. 67] в діапазоні  $V_d > 3kT/q$ . Необхідно підкреслити, що під час апроксимації нахил кривої може розглядатися або як незалежна величина, яка обчислюється, або як відома величина, що визначається попередньо визначеним (під час апроксимації функції (eqWerner)) значенням  $n_{id}$ . В роботі розглянуто обидва випадки. Якщо величини  $R_s$  and  $n_{id}$  визначались шляхом лінійної апроксимації функції (eqWerner), а  $\Phi_b$  — як перетин залежності  $\ln I = f(V_d)$  при відомому нахилі, то використовується позначення «Werner». Якщо ж лише  $R_s$

визначається за допомогою функції Вернера (3.12), а  $\Phi_b$  and  $n_{id}$  обчислюються потім із залежності  $\ln I = f(V_d)$ , то використовується позначення «Werner\*». Подібний підхід до позначень отриманих результатів (із зірочкою та без неї належно від того, скільки незалежних величин використовується при апроксимації скорельованих відповідно до визначеного раніше значення послідовного опору ВАХ) використовуються і для інших методів, детальніше описаних нижче.

R. Cibils та R. Buitrago [?] запропонували використовувати допоміжну функцію у вигляді

$$F_a(V) = V - V_a \ln I, \quad (3.13)$$

де  $V_a$  практично довільне значення напруги,  $V_a \geq 99,5 I_s R_s + n_{id} kT/q$ . Якщо  $I_{min,a}$  — це значення струму, яке відповідає напрузі  $V_{min}$ , при якій спостерігається мінімум функції  $F_a(V)$ , то залежність  $I_{min,a}$  від  $V_a$  має бути [?] лінійною:

$$I_{min,a} = (V_a - n_{id} kT/q) / R_s. \quad (3.14)$$

В роботі при побудові сімейства допоміжних функцій згідно з виразом (3.13), використовувалися значення  $V_a$  в діапазоні від 0,035 В до максимального значення напруги для даної ВАХ. Крок зміни  $V_a$  дорівнював 1 мВ. Отримані результати позначені міткою «Cibils».

A. Kaminski зі співавторами [?] запропонували два методи. Перший з них використовує допоміжну функцію, яка будується з використанням інтегрування ВАХ. Так, ордината та абсциса  $j$ -ої точки допоміжного графіку розраховуюся як

$$Y_j = \frac{1}{I_j - I_1} \int_{V_1}^{V_j} I dV \quad \text{and} \quad X_j = \frac{I_j + I_1}{2}, \quad (3.15)$$

де  $V_i$  та  $I_i$  — це координати  $i$ -ої точки ВАХ,  $i \in (1, \dots, N_p)$ ,  $j \in (2, \dots, N_p)$ . Згідно з цим методом очікується, що залежність  $Y$  від  $X$  має бути лінійною, причому

$$Y = n_{id} kT/q + R_s X. \quad (3.16)$$

Тобто, лінійна апроксимація допоміжної функції дозволяє визначити  $R_s$  та  $n_{id}$ .

В роботі лінійна апроксимація здійснювалась за допомогою методу найменших квадратів. Чисельне інтегрування ВАХ здійснювалось за методом

трапецій [?, с. 98]. Отримані результати позначені мітками «Kaminski I» та «Kaminski\* I».

У другому методі, розглянутому в роботі [?], також використовується допоміжна функція  $Y$  від  $X$ , проте

$$Y_k = \frac{\ln(I_j/I_i)}{I_j - I_i} \quad \text{and} \quad X_k = \frac{V_j - V_i}{I_j - I_i}, \quad (3.17)$$

$i \in (1, \dots, N_p - 1)$ ,  $j \in (i + 1, \dots, N_p)$ ,  $k \in (1, \dots, N_p(N_p - 1)/2)$ . Отримана таким чином залежність має бути прямолінійною:

$$Y = q(-R_s + X)/n_{id}kT. \quad (3.18)$$

Отримані за допомогою даного підходу результати позначені мітками «Kaminski II» та «Kaminski\* II».

У методі, запропонованому в роботі [?], використовуються дві функції Норда, побудовані з використанням двох різних значень  $\gamma_N$ :

$$\begin{aligned} F_1(V) &= V/\gamma_1 - kT/q \cdot \ln(I/AA^*T^2), \\ F_2(V) &= V/\gamma_2 - kT/q \cdot \ln(I/AA^*T^2). \end{aligned} \quad (3.19)$$

Передбачено, що параметри ДШ визначаються за допомогою співвідношень

$$n_{id} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\gamma_1 I_{min,2} - \gamma_2 I_{min,1}}{I_{min,2} - I_{min,1}} + \right. \quad (3.20)$$

$$\left. \frac{V_{min,1} - V_{min,2} + (\gamma_2 - \gamma_1)kT/q}{F_2(V_{min,2}) - F_1(V_{min,1}) - V_{min,2}/\gamma_2 + V_{min,1}/\gamma_1} \right],$$

$$R_s = \frac{kT}{2q} \left[ \frac{\gamma_1 - n_{id}}{I_{min,1}} + \frac{\gamma_2 - n_{id}}{I_{min,2}} \right], \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \Phi_b &= \frac{1}{2} \left[ F_1(V_{min,1}) + \frac{(\gamma_1 - n_{id})(qV_{min,1} - \gamma_1 kT)}{\gamma_1 q n_{id}} + \right. \\ &\quad \left. F_2(V_{min,2}) + \frac{(\gamma_2 - n_{id})(qV_{min,2} - \gamma_2 kT)}{\gamma_2 q n_{id}} \right]. \end{aligned} \quad (3.22)$$

де  $[F_1(V_{min,1}), V_{min,1}]$  та  $[F_2(V_{min,2}), V_{min,2}]$  — це координати мінімумів функцій  $F_1(V)$  від  $V$  та  $F_2(V)$  від  $V$ , відповідно;  $I_{min,1}$  та  $I_{min,2}$  — значення струму, які відповідають на ВАХ значенням напруги  $V_{min,1}$  та  $V_{min,2}$ , відповідно.

Проведені чисельні дослідження показали, що, як і в методі Норда, в цьому випадку точність визначення параметрів залежить від вибору величин  $\gamma_1$  та

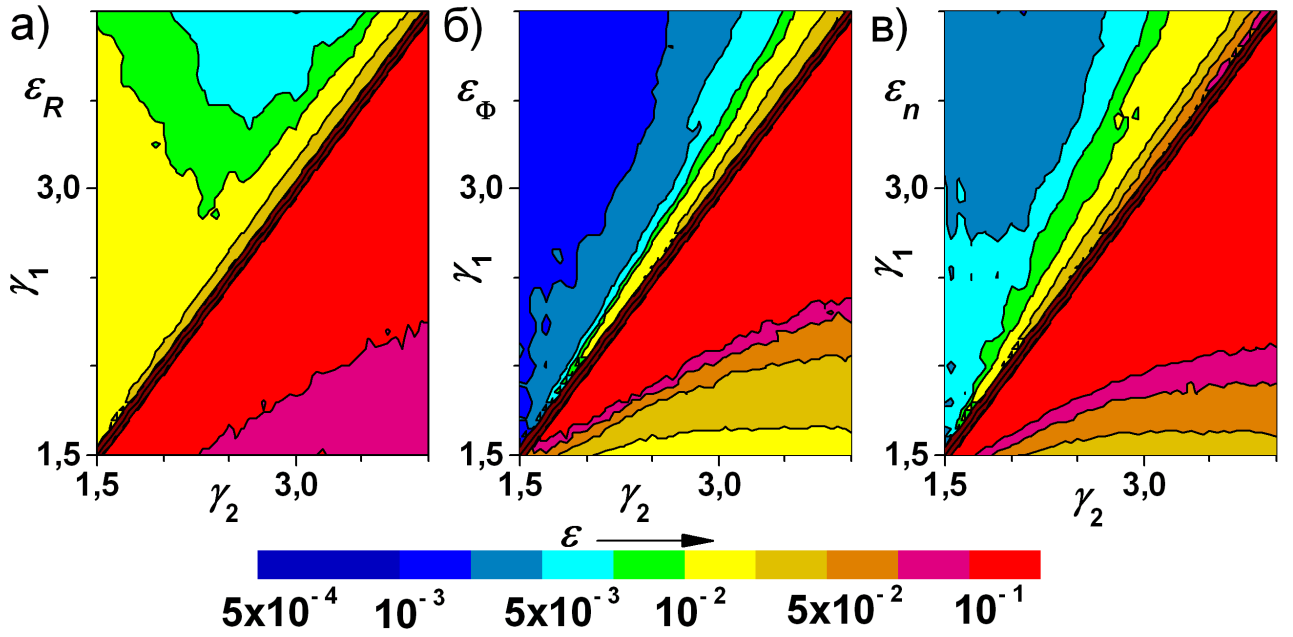


Рис. 3.2 — Залежності точностей визначення  $R_s$  (а),  $\Phi_b$  (б) та  $n_{id}$  (в) від величини параметрів  $\gamma_1$  та  $\gamma_2$  при застосуванні метода Бохліна. Наведено результати, отримані для наборів ідеальних ( $\sigma_V = 0$  V,  $\sigma_I^\varepsilon = 0$ ) синтезованих ВАХ (область  $\gamma_1 > \gamma_2$ ) та зашумлених ( $\sigma_V = 0,3$  мВ,  $\sigma_I^\varepsilon = 1\%$ ) даних (область  $\gamma_2 > \gamma_1$ ).

$\gamma_2$ . Отримані результати приведені на Рис. 3.2. Зокрема виявлено, що похибка екстрагування параметрів зростає при збільшенні модуля різниці параметрів  $|\gamma_1 - \gamma_2|$ . З метою мінімізації помилок методу в подальшому наведені результати, отримані при використанні величин  $\gamma_1 = 1,6$  та  $\gamma_2 = 3,5$ . Отримані результати позначені міткою «Bohlin».

В роботі [?] для визначення параметрів ДШ запропоновано використовувати масив функцій  $\{F_L(I)\}$ :

$$F_L(I) = V(I) - V_a \ln I, \quad (3.23)$$

де  $V_a$  — це довільне значення напруги. Кожна з функцій  $F_L(I)$  має бути апроксимована залежністю

$$y(I) = c_1 + c_2 I + c_3 \ln I \quad (3.24)$$

та параметри  $c_1$ ,  $c_2$  та  $c_3$  мають бути визначені. Тоді очікується [?], що при  $V > 3kT/q$ , залежність  $I_a = -c_3/c_2$  від  $V_a$  має бути лінійною:

$$I_a(V_a) = (-n_{id}kT/q + V_a)/R_s, \quad (3.25)$$



що дозволяє визначити послідовний опір та фактор неідеальності. В свою чергу,  $\Phi_b$  може бути розрахований [?] за допомогою виразу

$$\Phi_b = c_3/n_{id} + kT/q \cdot \ln(AA^*T^2). \quad (3.26)$$

В роботі при застосуванні даного методу використовувалися значення  $V_a$  починаючи з 40 мВ з кроком 20 мВ; апроксимація  $F_L(I)$  здійснювалась за методом найменших квадратів. Отримані дані позначені міткою «Lee».

В роботі Д. Громова та В. Пугачевича [?] розглянуто два можливі шляхи визначення параметрів ДШ. Згідно з першим з них, залежність напруги від струму може бути апроксимована виразом (3.24) причому

$$R_s = c_2, \quad (3.27)$$

$$n_{id} = (c_3q)/(kT), \quad (3.28)$$

$$\Phi_b = [c_1/c_3 + \ln(AA^*T^2)] kT/q. \quad (3.29)$$

Другий шлях полягає у тому, що вираз (3.24) застосовується до апроксимації функції Норда з  $\gamma_N = 2$ :

$$F(I) = V(I)/2 - kT/q \cdot \ln(I/AA^*T^2). \quad (3.30)$$

В цьому випадку [?]

$$R_s = 2c_2, \quad (3.31)$$

$$n_{id} = (2c_3q)/(kT) + 2, \quad (3.32)$$

$$\Phi_b = \frac{2c_1}{n_{id}} + \frac{(2 - n_{id})kT}{n_{id}q} \ln(AA^*T^2). \quad (3.33)$$

Застосування методів показало, що обидва підходи приводять до абсолютно однакових результатів. Більше того, визначені значення параметрів дуже близькі до даних, які отримані за однакових початкових умов при використанні методу, описаного в роботі [?] та згаданого трохи вище. Тобто ці методи не є незалежними.

З іншого боку, проведені оцінки показали, що точність визначення параметрів за допомогою цих методів залежить від діапазону вихідної ВАХ, який використовується для побудови допоміжної функції, яка потім апроксимується

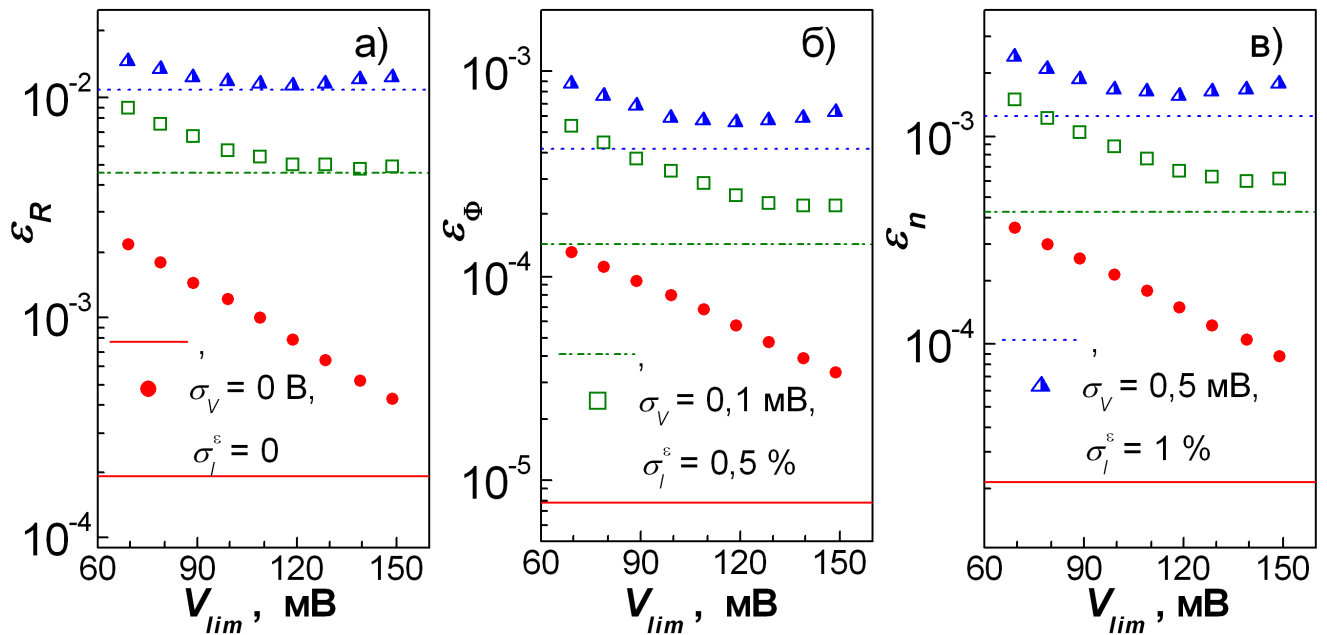


Рис. 3.3 — Залежності точності визначення  $R_s$  (а),  $\Phi_b$  (б) та  $n_{id}$  (в) при використанні методу Громова. Наведено результати, отримані при апроксимуванні залежністю (3.24) допоміжної функції, побудованої на основі ділянки ВАХ в діапазоні напруг від  $V_{lim}$  до максимального значення.

Горизонтальні лінії вказують похибки значень параметрів ДШ, які отримані при використанні адаптивної процедури (див. текст). Представлені результати, отримані при застосуванні методу до ідеальних синтезованих ВАХ (заповнені кружечки, суцільні лінії) та зашумлених даних з  $\sigma_V = 0,1$  мВ та  $\sigma_I^\varepsilon = 0,5\%$  (незаповнені квадрати, штрих-пунктирні лінії) та з  $\sigma_V = 0,5$  мВ та  $\sigma_I^\varepsilon = 1\%$  (напівзаповнені трикутники, пунктирні лінії)

залежністю (3.24). Так, на Рис. 3.3 наведено залежності похибок екстрагованих параметрів від початкового значення діапазону напруг, в якому проводилась апроксимація. Видно, що для ідеальних ВАХ точність підвищується при звуженні використаного діапазону. Водночас, для зашумлених даних спостерігається екстремальне значення точності при певних значеннях ширини діапазону. Причому ширина та положення діапазону, при якому точність визначення параметрів найбільша, залежить від рівня шуму.

У зв'язку з цим, для покращення ефективності роботи методів Громова та Лі, пропонується використовувати спеціальну адаптивну процедуру вибору діапазону побудови допоміжної функції. Вона полягає в тому, що параметрів визначаються для всіх можливих діапазонів, кількість яких залежить від кількості точок вихідної ВАХ. Після цього для кожного отриманого набору параметрів

обчислюється величина  $\theta = \sum_{i=1}^{N_p} [1 - I_{calc}(V_i)/I_i]^2$ , де  $I_{calc}(V_i)$  розраховується з використанням виразів (3.1) та (3.2). Найкращим за точністю вважається той набір параметрів, для якого спостерігається мінімум величини  $\theta$ .

Зрозуміло, що подібна адаптивна процедура збільшує час, необхідних для визначення параметрів ДШ через необхідність багатократного повторення застосування методу Громова (Лі) та додаткових розрахунків. Проте, з іншого боку, ця процедура може бути автоматизована, а також дозволяє підвищити точність — див. лінії на Рис. 3.3.

Нижче представлені результати застосування методу Громова з використанням запропонованої адаптивної процедури. Отримані дані позначені міткою «Gromov». Різниця між ними та позначеними міткою «Lee» визначає, фактично, доцільність запропонованої процедури.

В роботі [?] запропоновано визначати параметри ДШ шляхом побудови залежностей функцій  $H(V)$

$$H(I) = V - \frac{n_{id}kT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right). \quad (3.34)$$

та  $dV/d(\ln I)$  від сили струму. За умови  $V_d > 3kT/q$  ці залежності мають бути лінійними, причому

$$\frac{dV}{d \ln I} = R_s I + n_{id}kT/q, \quad (3.35)$$

$$H(I) = n_{id}\Phi_b + IR_s. \quad (3.36)$$

При застосуванні методу спочатку визначаються  $R_s$  та  $n_{id}$  на основі рівняння (3.35), а потім  $\Phi_b$ , використовуючи вираз (3.36) та обчислене на попередньому кроці значення  $n_{id}$ . Отримані результати позначені міткою «Chung».

Ще одним методом, де використовуються диференційні коефіцієнти ВАХ, є запропонований в роботі [?]. В цьому випадку все починається з обчислення функції  $\alpha(V)$ :

$$\alpha(V) = d(\ln I)/d(\ln V). \quad (3.37)$$

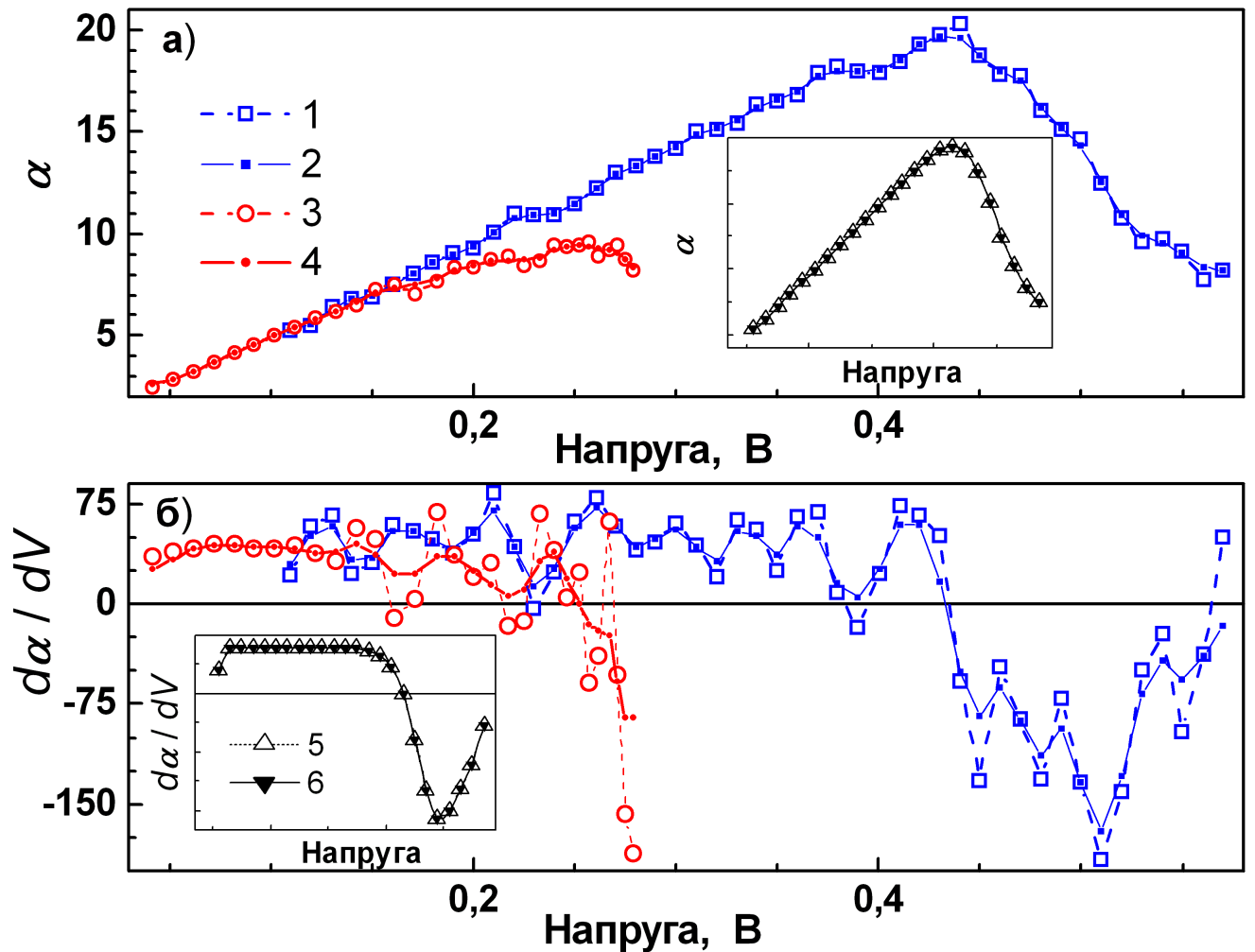


Рис. 3.4 — Залежності функції (3.37) (а) та її похідної (б) від напруги. Наведено графіки для зашумлених даних ( $\sigma_V = 0,3$  мВ,  $\sigma_I^\varepsilon = 1\%$ , криві 1 та 2), для експериментально вимірюваних ВАХ (криві 3 та 4) та для ідеальних синтезованих ВАХ (вставка, криві 5 та 6) до (1, 3, 5) та після (2, 4, 6) запропонованої обробки.

Визначення параметрів відбувається з використанням співвідношень

$$R_s = \frac{V_{max}}{\alpha_{max}^2 I_{max}}, \quad (3.38)$$

$$n_{id} = \frac{q V_{max} (\alpha_{max} - 1)}{\alpha_{max}^2 k T}, \quad (3.39)$$

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \left[ \alpha_{max} + 1 - \ln \left( \frac{I_{max}}{A A^* T^2} \right) \right]. \quad (3.40)$$

де  $\alpha_{max}$  та  $V_{max}$  це координати максимуму залежності  $\alpha$  від  $V$ ;  $I_{max}$  — сила струму, яка відповідає напрузі  $V_{max}$ .

Зауважимо, що однією з необхідних властивостей методу, які використовуються для обчислення параметрів пристроїв з набору ВАХ, отриманих за різних

умов, є можливість його застосування в автоматичному режимі. В цьому випадку один з найпоширеніших варіантів пошуку екстремуму полягає у знаходженні нулів похідної. Як видно з виразів (3.37)–(3.40), для даного методу це означає необхідність проведення процедури чисельного знаходження другої похідної ВАХ.

Рис. 3.4(а) показує, що при використанні експериментальних ВАХ чи зашумлених даних чисельне диференціювання викликає появу багаточисленних локальних екстремумів на залежності функції  $\alpha$  від  $V$ . Ці екстремуми заважають автоматичному виявленню точки максимуму через наявність багатьох нульових точок на залежності  $d\alpha/dV$  від  $V$  — див. Рис. 3.4(б). З метою подолання цих труднощів, в роботі запропоновано проводити спеціальну 2-стадійну процедуру обробки даних. А саме, на першій стадії обробки до отриманої з ВАХ залежності  $\alpha$  від  $V$  пропонується застосовувати 3–точковий медіанний фільтр, після чого, на другій стадії, проводити згладжування. І лише після цього, проводити визначення положення максимуму, знаходження величин  $\alpha_{max}$ ,  $V_{max}$  та  $I_{max}$  і розрахунок величин параметрів ДШ. Дані на Рис. 3.4 показують, що запропонована процедура обробки дійсно зменшує вплив побічних максимумів та дозволяє покращити точність методу. Згладжування здійснюється завдяки усередненню по трьом сусіднім точкам з ваговими коефіцієнтами, які визначаються розподілом Гауса з дисперсією, рівною 0,6.

Надалі наведено результати, позначені міткою «Mikhelashvili» та отримані з використанням зазначеної процедури обробки.

### 3.4.2 Чисельні методи

Надалі також наведені результати отримані при використанні стандартного методу найменших квадратів зі статистичними ваговими коефіцієнтами [?, с. 67]. В цьому випадку параметри визначались шляхом мінімізації квадратичної форми

$$S(I_s, n_{id}, R_s) = \sum_{i=1}^{N_p} I_i^{-1} [I_i - I_{calc}(V_i, I_s, n_{id}, R_s)]^2, \quad (3.41)$$

де  $I_{calc}$  — значення сили струму, отримане при інтерполяції. При мінімізації шукався розв’язок системи рівнянь, отриманих з умов  $\partial S/\partial I_s = 0$ ,  $\partial S/\partial n_{id} = 0$  та  $\partial S/\partial R_s = 0$ . Пошук розв’язку цієї системи нелінійних рівнянь проводився за допомогою методу покоординатного градієнтного спуску [?, с. 231]. Як критерій зупинки ітераційного процесу було вибрано умову  $|(S_j - S_{j+1})/S_j| < 10^{-12}$ , де  $S_j$  — це значення квадратичної форми на  $j$ -му кроці ітерації. Початкове наближення величини  $R_s$  обчислювалося шляхом визначення перетину з координатною віссю залежності  $(dV/dI)/I$  від  $1/I$ , побудованої з використанням останніх п’яти точок ВАХ. Початкові наближення  $I_s$  та  $n_{id}$  отримувалися шляхом лінійної апроксимації залежності  $\ln I$  від  $V_d$ , причому для визначення останньої величини використовувалися початкове наближення  $R_s$ .

Було розглянуто два варіанти методу найменших квадратів. В першому з них для обчислення  $I_{calc}$  використовувався вираз (3.1), тобто квадратична форма мала вигляд

$$S(I_s, n_{id}, R_s) = \sum_{i=1}^{N_p} I_i^{-1} \left[ I_i - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_i - I_i R_s)}{n_{id} k T} \right] - 1 \right\} \right]^2. \quad (3.42)$$

Отримані внаслідок мінімізації функції (3.42) результати позначені міткою «Ordinary LS».

В другому випадку при побудові квадратичної форми використовувалася  $W$ -функція Ламберта. За визначенням, функція  $W$  є розв’язком рівняння  $z = W(z) \cdot \exp(W(z))$ , її значення обчислюються за допомогою ряду [?]. Згідно з результатами, представленими в роботі [?], явний розв’язок трансцендентного рівняння (3.1) може бути виражений за допомогою основної гілки функції Ламберта, причому у випадку нехтування впливом шунтуючого опору він має вигляд

$$I(V) = \frac{n_{id} k T}{q R_s} W \left\{ \frac{q R_s}{n_{id} k T} \exp \left[ \frac{q(V + R_s I_s)}{n_{id} k T} \right] \right\} + I_s. \quad (3.43)$$

Тобто, квадратична форма може бути записана у вигляді

$$S(I_s, n_{id}, R_s) = \sum_{i=1}^{N_p} I_i^{-1} \left[ I_i - \frac{n_{id} k T}{q R_s} W \left\{ \frac{q R_s}{n_{id} k T} \exp \left[ \frac{q(V_i + R_s I_s)}{n_{id} k T} \right] \right\} - I_s \right]^2, \quad (3.44)$$

Результати, отримані при мінімізації форми (3.44), позначені міткою «Lambert LS».

### 3.4.3 Еволюційні алгоритми

Еволюційні алгоритми – це клас обчислювальних оптимізаційних моделей, які при своїй побудові та реалізації імітують поведінку живої природи. При своїй роботі вони оперують наборами (популяціями)  $P$  можливих розв’язків  $\vec{X}$ :  $P = \{\vec{X}_k\}$ ,  $k \in (1, \dots, N_S)$ , де  $N_S$  – це загальна кількість розв’язків у популяції. Кожен із розв’язків (претендентів на звання остаточного розв’язку) є вектором, що складається з дійсних чисел:  $\vec{X}_k = \{x_{k,i}\}$ ,  $i \in (1, \dots, N_D)$ , де  $N_D$  дорівнює загальній кількості параметрів, які потрібно оптимізувати. В нашому випадку  $N_D = 3$ ,  $\vec{X} = \{R_s, n_{id}, \ln I_s\}$ .

Перед початком оптимізаційного процесу створюється початкова популяція. Зазвичай початкові значення параметрів вибираються випадковим чином з інтервалу  $[\vec{X}^L, \vec{X}^H]$ :

$$x_{k,i,0} = x_i^L + r_{[0,1]}(x_i^H - x_i^L), \quad (3.45)$$

де  $r_{[0,1]}$  – випадкове число, рівномірно розподілене на інтервалі  $[0,1]$ ,  $\vec{X}^L = \{x_i^L\}$  та  $\vec{X}^H = \{x_i^H\}$  – нижня та верхня границі простору, де шукаються розв’язки, відповідно. В даній роботі проводився пошук у просторі, границі якого задані наступним чином:  $R_s \in [0, 50]$  Ом,  $n_{id} \in [1, 2]$ ,  $I_s \in [10^{-26}, 10^{-2}]$  А.

На кожному кроці ітерації а) проводиться трансформація кожного з розв’язків:  $\{\vec{X}_{k,j-1}\} \rightarrow \{\vec{X}_{k,j}\}$ ,  $j \in (1, \dots, N_{it})$ ,  $N_{it}$  – максимальна кількість ітерацій; процедура трансформації залежить від конкретного алгоритму і описана далі; б) розраховується значення функції придатності (або цільової функції)  $Fit(\vec{X}_{k,j})$  для кожного  $k$ -го розв’язку. Оптимальним для  $j$ -го ітераційного кроку розв’язком  $\vec{X}_j^{opt}$  вважається той, для якого значення функції придатності мінімальне:  $Fit(\vec{X}_j^{opt}) = \min \{Fit(\vec{X}_{k,j})\}$ . Кінцевим результатом вважається  $\vec{X}_{N_{it}}^{opt}$ .

В даній роботі використовувалася цільова функція у вигляді суми квадратів відносних похибок апроксимації кожної з точок ВАХ

$$Fit = \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ 1 - \frac{I_s}{I_i} \left[ \exp \left( \frac{q(V_i - I_i R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \right\}^2. \quad (3.46)$$

$N_{it}$  визначалося умовою збіжності розв’язку.

Метод диференційної еволюції імітує процеси природного відбору і використовує процеси диференційної мутації та випадкового схрещування. У термінології даного алгоритму кожен з розв'язків називається особою, а послідовність дій на  $j$ -му ітераційному кроці має наступний вигляд [?, ?]:

- Мутація. Для кожного вектору  $\vec{X}_{k,j-1}$  генерується вектор мутації  $\vec{M}_{k,j}$

$$\vec{M}_{k,j} = \vec{X}_{r_1,j-1} + F_{sc} \cdot (\vec{X}_{r_2,j-1} - \vec{X}_{r_3,j-1}), \quad (3.47)$$

де  $r_1, r_2, r_3 \in (1, \dots, N_S)$  вибираються випадковим чином і мають відрізнятися від індексу  $k$ .  $F_{sc} \in [0,2]$  — дійсна стала величина, що називається масштабним коефіцієнтом.

- Схрещування. Формується пробний вектор  $\vec{U}_{k,j}$

$$u_{k,i,j} = \begin{cases} m_{k,i,j}, & \text{if } r_{[0,1]} \leq CR \text{ or } i = r_4 \\ x_{k,i,j-1}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.48)$$

причому випадкова величина  $r_4 \in (1, \dots, N_D)$  забезпечує наявність в  $\vec{U}_{k,j}$  хоча б одного елемента з  $\vec{M}_{k,j}$ ; константа  $CR \in [0,1]$  називається темп схрещування. Спираючись на результати, представлені в [?], в даній роботі в даній роботі були використана штрафна функція, яка запобігає виходу розв'язків за межі пошукового простору. А саме, будь-який параметр, значення якого перевищувала допустимі межі, замінювався випадковою величиною згідно з

$$u_{k,i,j} = \begin{cases} u_{k,i,j} - r_{[0,1]}(x_i^H - x_i^L), & \text{if } u_{k,i,j} > x_i^H \\ u_{k,i,j} + r_{[0,1]}(x_i^H - x_i^L), & \text{if } u_{k,i,j} < x_i^L. \end{cases} \quad (3.49)$$

- Відбір.

$$\vec{X}_{k,j} = \begin{cases} \vec{U}_{k,j}, & \text{if } Fit(\vec{U}_{k,j}) < Fit(\vec{X}_{k,j-1}) \\ \vec{X}_{k,j-1}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.50)$$

Користуючись результатами, представленими в [?], були вибрані значення  $F_{sc} = 0,8$ ,  $CR = 0,3$  та  $N_S = 8N_D = 24$ . Виявлено, що збіжність результатів досягається при  $N_{it} = 600$ . Отримані результати позначені міткою «DE».

Розвиток методу оптимізації зграї частинок пов'язаний зі спостереженням соціальної поведінки тварин на кшталт зграї птахів чи риб. У термінології алгоритму PSO розв'язки називаються частинками, які летять (чи плавають) і



гіперпросторі параметрів. На  $j$ -му ітераційному кроці виконуються наступні дії [?]:

- Визначається найкраще положення  $\vec{X}_{k,j}^{best}$  для кожної з частинок:

$$\vec{X}_{k,j}^{best} = \begin{cases} \vec{X}_{k,j-1}^{best}, & \text{if } Fit(\vec{X}_{k,j-1}) \geq Fit(\vec{X}_{k,j}^{best}) \\ \vec{X}_{k,j-1}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.51)$$

- Визначається глобально найкраща позиція  $\vec{B}_j$  серед всіх частинок зграї:

$$\vec{B}_j = \min\{Fit(\vec{X}_{1,j}^{best}), \dots, Fit(\vec{X}_{N_S,j}^{best})\}. \quad (3.52)$$

- Вектор швидкості кожної частинки змінюється відповідно до наступного виразу

$$v_{k,i,j} = w_j v_{k,i,j-1} + l_1 r_{[0,1],1} \cdot (x_{k,i,j}^{best} - x_{k,i,j-1}) + l_2 r_{[0,1],2} \cdot (b_{i,j} - x_{k,i,j-1}), \quad (3.53)$$

де  $l_1$  та  $l_2$  називаються коефіцієнти навчання,  $w_j$  — інерційна маса. У даній роботі, використано підхід лінійного збільшення маси:

$$w_j = w_{max} - j(w_{max} - w_{min})/N_{it}, \quad (3.54)$$

де  $w_{max}$  та  $w_{min}$  — початкова та кінцева маси, відповідно. Після цього швидкість кожної з частинок оновлюється з використанням наступного виразу:

$$v_{k,i,j} = \begin{cases} v_i^{max}, & \text{if } v_{k,i,j} > v_i^{max} \\ -v_i^{max}, & \text{if } v_{k,i,j} < -v_i^{max} \\ v_{k,i,j}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.55)$$

де константа  $\vec{v}^{max}$  призначена стримувати надлишкові блукання частинок. Зазвичай [?]  $\vec{v}^{max}$  вибирається рівним максимально можливому відхиленню даної частинки в певному напрямі.

- Кожна частинка переміщується у нове положення:

$$\vec{X}_{k,j} = \vec{v}_{k,j} + \vec{X}_{k,j-1}, \quad (3.56)$$

Згідно з даними роботи [?], було використано наступні значення параметрів:  $l_1 = l_2 = 2$ ,  $w_{max} = 0,9$ ,  $w_{min} = 0,4$  та  $N_S = 15N_D = 45$ . Крім того, при розрахунках

вважалося, що початкові швидкості  $\vec{v}_{k,0} = 0$ . Виявлено, що збіжність результатів досягається при  $N_{it} = 700$ . Отримані результати позначені міткою «PSO».

Алгоритм методу модифікованої штучної бджолої сім'ї базується на поведінці рою медоносних бджіл, пов'язаний з пошуком їжі. Бджоли поділяються на три категорії: носії, спостерігачі та розвідники. Носії експлуатують свої джерела їжі та взаємодіють зі спостерігачами. Спостерігачі очікують у вулику та вирішують яке з джерел їжі експлуатувати. Розвідники проводять пошуки нових джерел їжі навколо вулика. Кількість носіїв та спостерігачів співпадає з кількістю розв'язків. Самі розв'язки описують розташування джерел їжі, а кількість нектару в джерелі визначається придатністю розв'язку. Коли джерело їжі повністю вичерпується, пов'язані з ним носії стають розвідниками. Дії, які передбачені під час  $j$ -ої ітерації наступні [?]:

- Створюється новий розв'язок  $\vec{T}_{k,j}$  для кожного носія

$$\vec{T}_{k,j} = \vec{X}_{k,j-1} + r_{[-1,1]}(\vec{X}_{k,j-1} - \vec{X}_{r,j-1}), \quad (3.57)$$

де  $r \in (1, \dots, N_S)$  — це випадковим чином вибраний індекс,  $r \neq k$ .

- Застосовується жадібний процес відбору до носіїв:

$$\vec{X}_{k,j-1} = \begin{cases} \vec{T}_{k,j}, & \text{if } Fit(\vec{T}_{k,j}) < Fit(\vec{X}_{k,j-1}) \\ \vec{X}_{k,j-1}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.58)$$

$$s_k = \begin{cases} 0, & \text{if } Fit(\vec{T}_{k,j}) < Fit(\vec{X}_{k,j-1}) \\ s_k + 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.59)$$

Тут  $\vec{S} = \{s_1, \dots, s_{N_S}\}$  вектор, який містить інформацію щодо зручності всіх джерел їжі. Початкові значення  $s_k = 0$ .

- Розраховується ймовірність  $p_k$  для кожного розв'язку:

$$p_k = \frac{(1 + Fit(\vec{X}_{k,j-1}))^{-1}}{\sum_{m=1}^{N_S} (1 + Fit(\vec{X}_{m,j-1}))^{-1}}. \quad (3.60)$$

- Для кожного спостерігача

а) створюється новий розв'язок  $\vec{T}_{k,j}$  з вибраного розв'язку  $\vec{X}_{k,j-1}$  by using Eq. (3.57) if  $r_{[0,1]} < p_k$ ,  $k = 1, \dots, N_S$ ;

б) застосовується механізм жадібного вибору — див. рівняння (3.58) та (3.59).

- Визначають відкинуті розв’язки та, відповідно, розвідники, і якщо вони існують, розв’язки замінюються новими, створеними випадковим чином

$$x_{k,i,j} = \begin{cases} x_i^L + r_{[0,1]}(x_i^H - x_i^L) & \text{if } s_k > L_{limit} \\ x_{k,i,j-1}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.61)$$

де  $L_{limit}$  — регулюючий параметр алгоритму, який визначає допустиме число поколінь, протягом яких кожне джерело їжі має бути відкинуте.

В розрахунках були використані значення  $L_{limit} = 36$  та  $N_S = 24$  [?]. Крім того вважалося, що найкращий розв’язок не може біти відкинуто. Виявлено, що збіжність результатів досягається при  $N_{it} = 250$ . Отримані результати позначені міткою «МABC».

Алгоритм оптимізованого викладання та навчання використовує концепцію навчального процесу в класі. Група учнів у класі розглядається як популяція розв’язків. Алгоритм імітує процес навчання, при якому учні спочатку отримують знання від учителя, а потім також і внаслідок спілкування між собою. Звичні дії на  $j$ -му кроці ітераційного процесу описуються наступним чином [?]:

- Етап учителя. Модифікація знань учня  $\vec{T}_{k,j}$  здійснюється з використанням виразу

$$\vec{T}_{k,j} = \vec{X}_{k,j-1} + r_{[0,1]} \left( \vec{X}_{j-1}^{opt} - r_{(1,\dots,2)} \vec{X}_{j-1}^{mean} \right), \quad (3.62)$$

для кожної особи  $\vec{X}_{k,j-1}$  в класі за виключенням вчителя ( $\vec{X}_{j-1}^{opt}$ ). Тут

$$x_{i,j-1}^{mean} = \frac{1}{N_S} \sum_{k=1}^{N_S} x_{k,i,j-1}. \quad (3.63)$$

Якщо виявляється, що  $\vec{T}_{k,j}$  є кращим ніж  $\vec{X}_{k,j-1}$ , то він його замінює згідно з виразом (3.58).

- Етап учня. Для кожного з учнів генерується новий розв’язок  $\vec{U}_{k,j}$ , причому

$$\vec{U}_{k,j} = \vec{X}_{k,j-1} + r_{[0,1]} \left( \vec{X}_{k,j-1} - \vec{X}_{r,j-1} \right), \quad (3.64)$$

$$\text{if } Fit(\vec{X}_{k,j-1}) > Fit(\vec{X}_{r,j-1})$$

$$\vec{U}_{k,j} = \vec{X}_{k,j-1} - r_{[0,1]} \left( \vec{X}_{k,j-1} - \vec{X}_{r,j-1} \right), \quad (3.65)$$

$$\text{if } Fit(\vec{X}_{k,j-1}) \leq Fit(\vec{X}_{r,j-1}),$$

де  $r \in (1, \dots, N_S)$  — індекс, вибраний випадковим чином,  $r \neq k$ . Після цього використовується вираз (3.50) для визначення  $\vec{X}_{k,j}$ .

В роботі використовувалася величина  $N_S = 1000$ . Розрахунки показали, що збіжність розв'язку спостерігається при  $N_{it} = 900$ . Отримані результати позначені міткою «TLBO».

### 3.5 Порівняння ефективності методів визначення параметрів структур МН

#### 3.5.1 Точність визначення параметрів на основі ідеальних ВАХ

Точність визначення параметрів з окремої ВАХ залежно від температури, при якій її синтезовано, наведено на Рис. 3.5. Насамперед зауважимо, що наведені дані показують:

- а) при використанні всіх еволюційних алгоритмів для аналізу однакових ВАХ були отримані дуже близькі значення як послідовного опору, так і ВБШ та фактору неідеальності; це цілком очікуваних результат, пов'язаний з тим що у всіх випадках використовувалася ідентична цільова функція;
- б) використання адаптивної процедури в методі Gromov дає можливість суттєво знизити помилки визначення параметрів;
- в) використання функції Ламберта при чисельних обчисленнях дозволяє зменшити помилки визначення параметрів порівняно з випадком, коли в методі найменших квадратів використовується трансцендентна форма рівняння ВАХ;
- г) при застосуванні методів Werner, Cibils, та Kaminskii I шляхом лінійної апроксимації допоміжної функції доцільно визначати лише величину послідовного опору, тоді як  $\Phi_b$  та  $n_{id}$  краще екстрагувати на наступному етапі, при лінійній апроксимації ВАХ, скорегованої з врахуванням отриманого значення  $R_s$ ; іншими словами використання варіантів цих методів, позначених зірочками дозволяє підвищити точність визначення параметрів;
- д) найбільшу точність при аналізі ідеальних синтезованих ВАХ вдається досягти при використанні еволюційних алгоритмів, апроксимації за допомогою

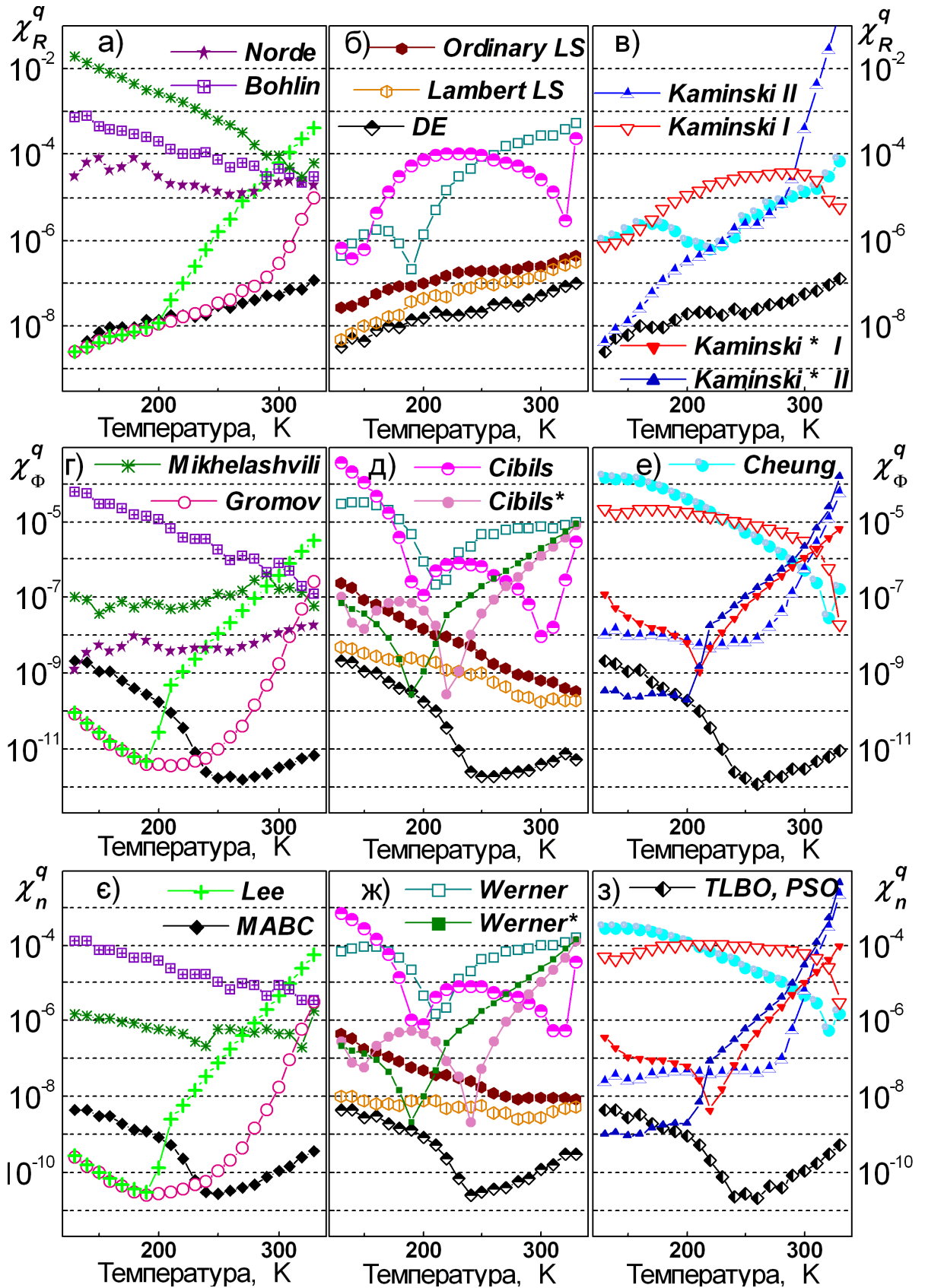


Рис. 3.5 — Залежності точності визначення послідовного опору (а — в), ВБШ (г — е) та фактору неідеальності (є — з) при використанні різних методів від температури. Результати отримані при використанні ідеальних синтезованих ВАХ.

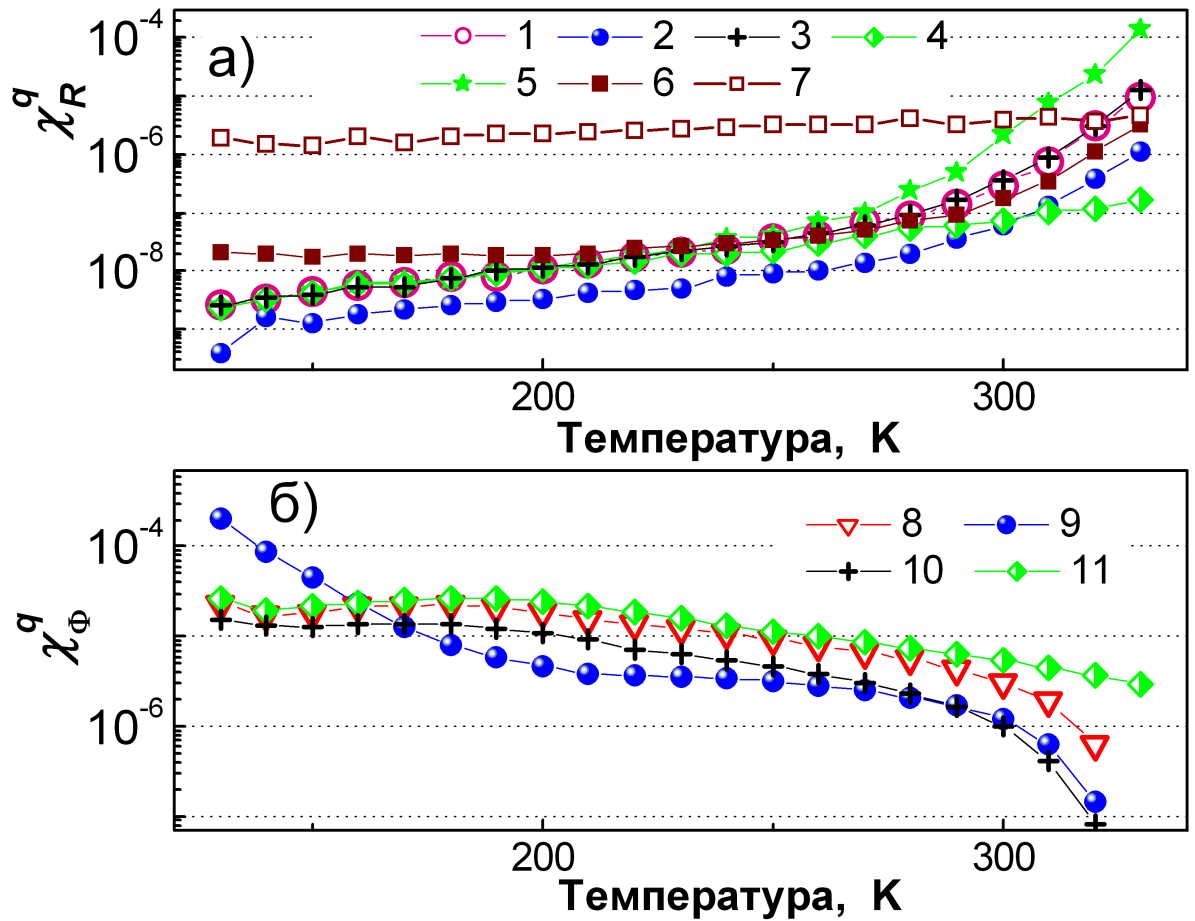


Рис. 3.6 — Температурні залежності точності визначення  $R_s$  (а) та  $\Phi_b$  (б) при використанні методів Gromov (а) та Kaminskii I (б). Під час синтезу ВАХ використовувалися параметри, величини яких переважно визначались формулами (3.2–3.5), проте для побудови кривих 2 та 9 використовувалися ВАХ для яких значення  $R_s$  було в 3 рази більше, для кривих 3 та 10 величина  $n_{id}$  була в 1,2 рази більша, для кривих 4 та 11 величина  $I_s$  була в 100 разів менша, для кривої 5 значення  $\Phi_b$  було зменшено на 0,1 еВ, для кривої 6 величини  $R_s$  та  $\Phi_b$  залишалися незмінними та рівними 2 Ом та 0,7 еВ, відповідно, під час синтезу всього набору ВАХ (були незалежні від температури), для кривої 7 значення  $R_s$  та  $I_s$  були незмінні та рівні 2 Ом та  $10^{-5}$  А, відповідно.

методу найменших квадратів з використанням функції Ламберта, Norde (при визначенні  $\Phi_b$ ), Ordinary LS (при визначенні  $R_s$ ), методу Gromov, доповненого адаптивною процедурою, та методу Lee (за винятком випадків високих температур та великих значень  $I_s$ ).

З іншого боку, наведені результати показують, що точність визначення параметрів змінюється для різних ВАХ з одного набору (залежить від температури,

при якій ВАХ була синтезована). Фактично мова йде про те, що похибка визначення параметру з масиву  $\{R_s, n_{id}, I_s\}$  залежить як від його величини, так і від значення інших характеристик ДШ з цього набору. Для виявлення подібних залежностей всі методи були також застосовані до синтезованих даних, при створенні яких вважалося, що одна з величин з набору  $(R_s, \Phi_b, I_s, n_{id})$  відрізняється за значенням від того, який очікується згідно з виразами (3.2–3.5). Деякі характерні результати наведені на Рис. 3.6.

Рис. 3.6,а показує що, похибки визначення послідовного опору при використанні методу Gromov

- а) зростають з підвищенням  $\Phi_b$ ;
- б) зменшуються при збільшенні  $R_s$  та зменшенні  $I_s$ ;
- в) залишаються практично постійними при зміні  $n_{id}$ .

Очевидно, що  $I_s$  та  $\Phi_b$  пов'язані між собою співвідношенням (3.2). Проте, на нашу думку, саме величина струму насичення, а не ВБШ, є першочерговим фактором впливу на процес визначення  $R_s$ . На користь цього висновку свідчать криві 6 та 7 на Рис. 3.6,а. Так, крива 6 була отримана для набору ВАХ, які синтезовані використовуючи припущення що незалежними від температури є як  $R_s$ , так і  $\Phi_b$ . Незважаючи на ці обмеження,  $\chi_R^q$  зростає при збільшенні температури. На противагу, крива 7, отримана для незалежних від температури  $R_s$  та  $I_s$ , показує, що точність визначення послідовного опору залишається практично постійною для всього набору ВАХ. З іншого боку, Рис. 3.6,б показує, що при використанні методу Kaminskii I зменшення струму насичення підвищує похибку визначення ВБШ. Загалом проведені дослідження показують, що величина  $I_s$  є основним, а величина  $\Phi_b$  другорядним визначальними факторами для точності екстракції інших параметрів (не лише  $R_s$ ) при використанні різних методів (не лише Gromov). З Рис. 3.6,б також видно, що похибка визначення  $\Phi_b$  зменшується у випадку більших значень фактору неідеальності (криві 8 та 10). В той же час збільшення послідовного опору немонотонно впливає на точність екстракції ВБШ (криві 8 та 9 на Рис. 3.6,б): при низьких температурах (високих значеннях  $\Phi_b$ )  $\chi_\Phi^q$  зростає, при високих  $T$  — навпаки, зменшується.

Узагальнюючи аналіз отриманих результатів, можна зробити однозначний висновок, що точність визначення кожного з параметрів зростає зі збільшенням його величини. Проте, точність визначення  $\chi_{x_i}^q$  даного параметру ( $x_i \in \{R_s, n_{id}, I_s\}$ ) залежить також і від абсолютних величин інших характеристик ДШ ( $x_j, j \neq i$ ), причому характер цих залежностей є функцією абсолютних значень кожного параметру з набору і змінюється при використанні різних методів ( $\chi_{x_i}^q = f(x_i, x_j, \text{метод})$ ).

Для того, щоб виявити основні тенденції цих залежностей були проведені додаткові дослідження. А саме, були синтезовані набори ВАХ, при побудові яких вважалося, що деякі параметри є незалежними від температури. В цьому випадку а) постійними у всьому температурному діапазоні вважалася два параметри ( $R_s$  та  $I_s$  або  $n_{id}$  та  $I_s$  для різних наборів ВАХ); б)  $n_{id}$  (або  $R_s$ ) розраховувалися відповідно до того, як описано раніше, в розділі 3.2.1. Було створено сукупність наборів ВАХ, для яких незалежні від температури величини  $R_s$ ,  $n_{id}$  та  $I_s$  змінювались в діапазонах від 2 до 41 Ом, від 1 до 1,52 та від  $10^{-10}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  А, відповідно. Після цього кожен з методів було застосовано до кожного з набору ВАХ, визначено величини параметрів, а також їх похибки. Найбільш типові результати наведено на Рис. 3.7–3.9. Зокрема, Рис. 3.7,а підтверджує, що при використанні методу Gromov збільшення  $R_s$  та  $I_s$  призводить до зменшення та збільшення помилки визначення послідовного опору, відповідно.

Отримані результати щодо факторів впливу узагальнено в Таблиці 2. В цій таблиці використано ряд символів для опису поведінки точності визначення параметрів при зміні величини фактору впливу. А саме. Якщо помилка визначення монотонно зростає або зменшується зі збільшенням впливаючого фактору, то використовувались символи «↓» та «↑», відповідно. Наприклад, саме ці символи характеризують кореляцію точності визначення  $R_s$  за допомогою методу Gromov та величини  $R_s$  та  $I_s$ .



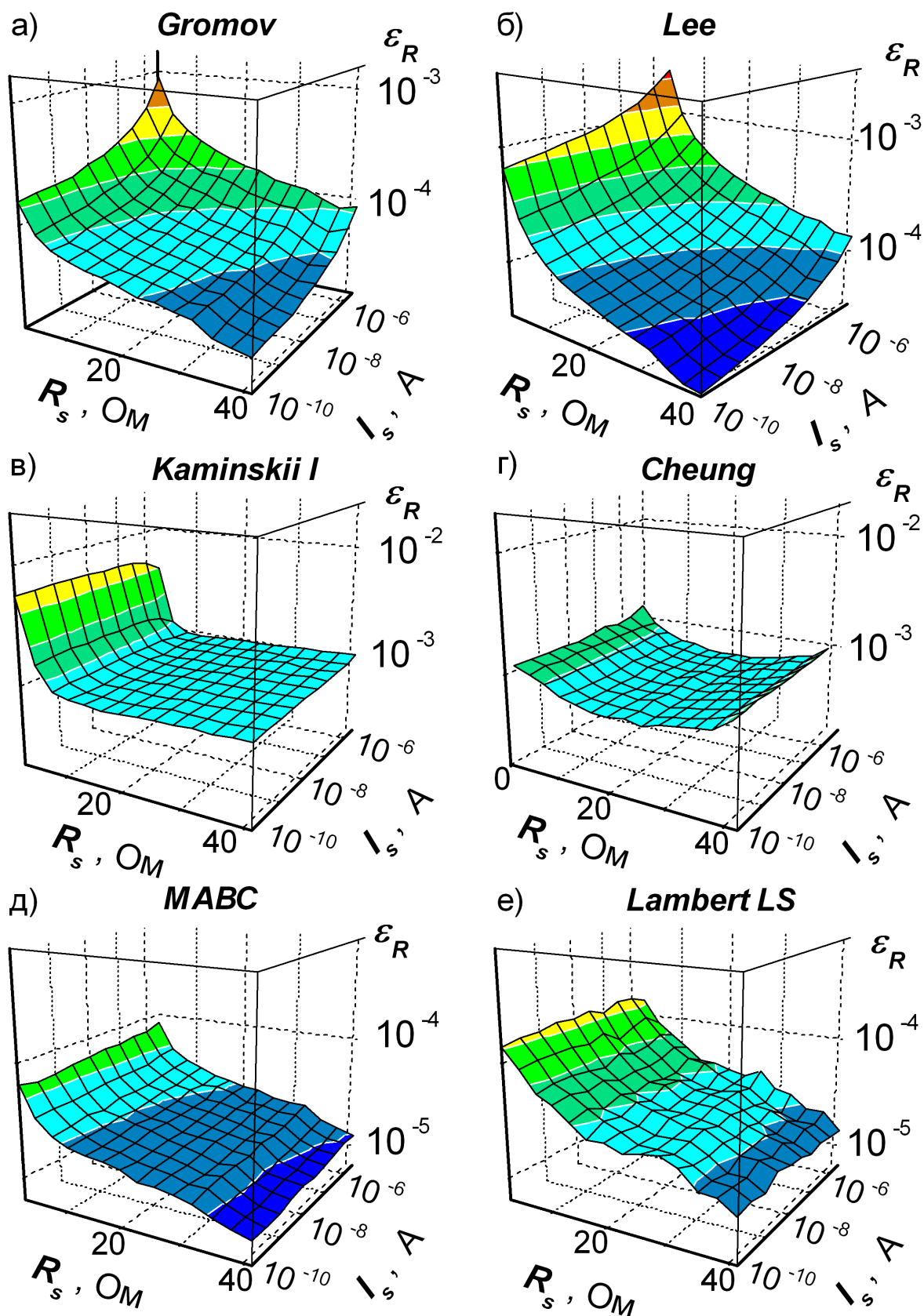


Рис. 3.7 — Точність визначення величини послідовного опору з набору ВАХ, який був синтезований при постійних значеннях  $R_s$  та  $I_s$ . Показані результати застосування методів Gromov (а), Lee (б), Kaminskii I (в), Cheung (г), MABC (д) та Lambert LS (е).

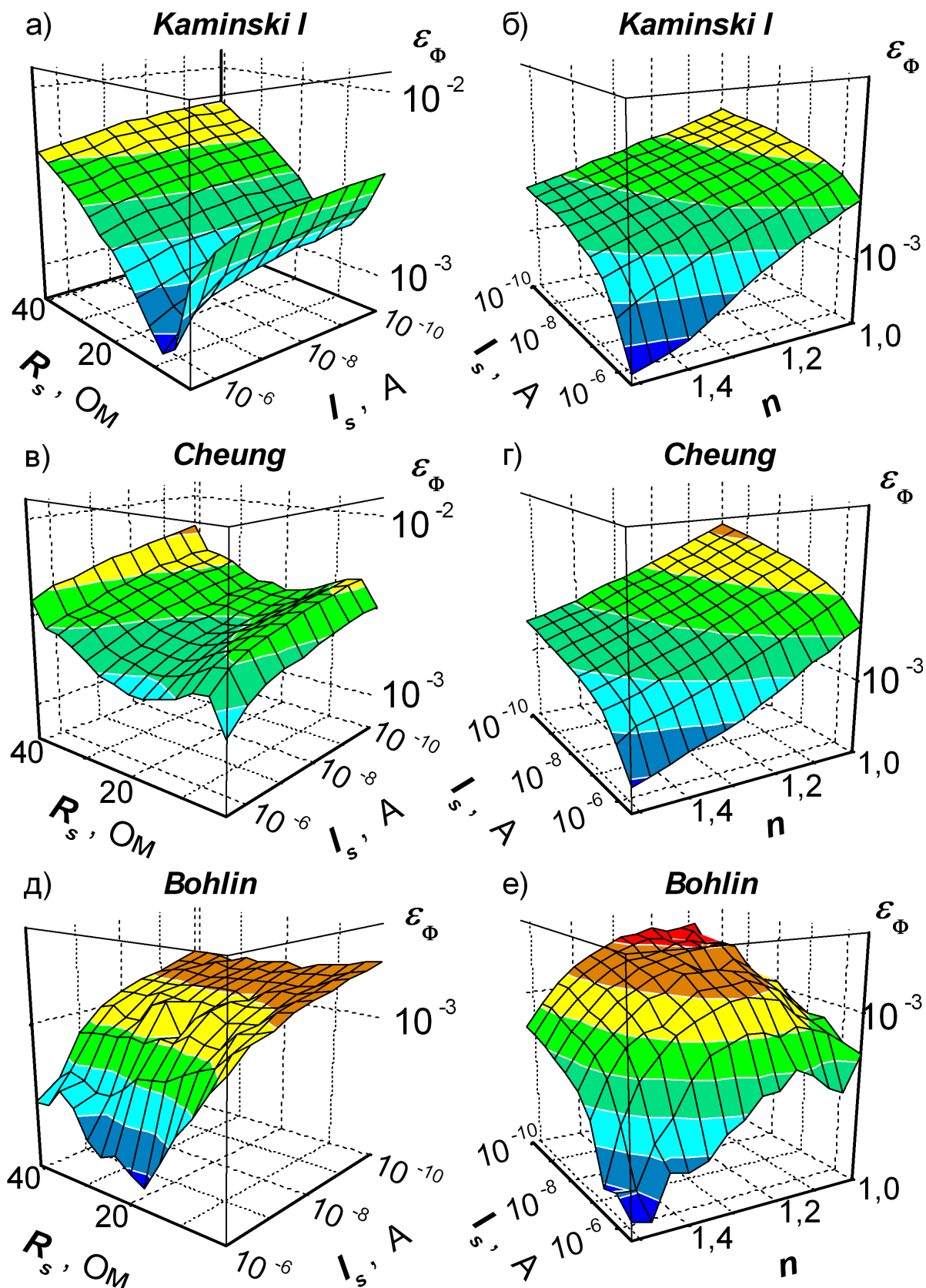


Рис. 3.8 — Точність визначення величини висоти бар'єру Шотки опору з набору ВАХ, який був синтезований при постійних значеннях  $R_s$  та  $I_s$  (рисунки а, в та д) або постійних значеннях  $n_{id}$  та  $I_s$  (рисунки б, г, е). Показані результати застосування методів Каминської I (а, б), Чеунга (в, г) та Бохліна (д, е).

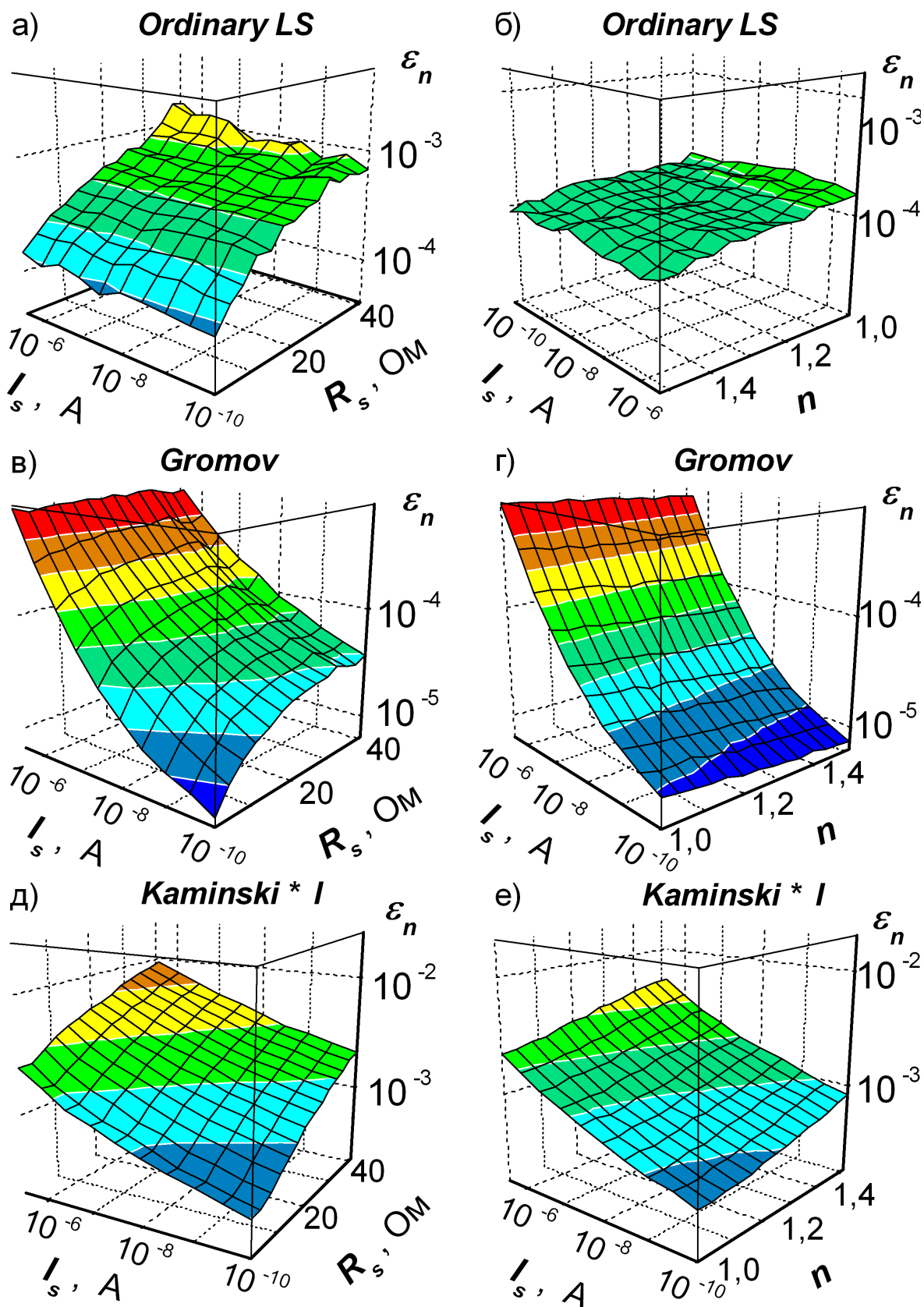


Рис. 3.9 — Точність визначення величини фактору неідеальності з набору ВАХ, який був синтезований при постійних значеннях  $R_s$  та  $I_s$  (рисунки а, в та д) або постійних значеннях  $n_{id}$  та  $I_s$  (рисунки б, г, е). Показані результати застосування методів Ordinary LS (а, б), Gromov (в, г) та Kaminskii\* I (д, е).

Табл. 2 — Фактори впливу на точність визначення параметрів ДШ.

Метод	Визначений параметр		
	$R_s$	$\Phi_b$	$n$
Norde <sup>1</sup>	$n^w(\vee)$	$I_s(\downarrow)$	—
Werner	$R_s(\vee)$	$R_s(\downarrow), I_s^w(\downarrow), n^w(\downarrow)$	$R_s(\uparrow), n^w(\downarrow)$
Werner*		$R_s(\vee), I_s(\uparrow), n(\uparrow)$	$R_s(\vee), I_s(\uparrow), n^w(\uparrow)$
Cibils	$R_s(\vee), n(\uparrow)$	$R_s(\uparrow), n(\vee)$	$R_s(\uparrow), n(\vee)$
Cibils*		$R_s(\vee), I_s(\uparrow), n(\uparrow)$	$R_s(\vee), I_s(\uparrow), n(\uparrow)$
Kaminskii I	$R_s(\leftarrow), n^w(\downarrow)$	$R_s(\vee), I_s(\downarrow), n(\downarrow)$	$R_s(\vee), I_s^w(\downarrow), n(\downarrow)$
Kaminskii* I		$R_s(\uparrow), I_s(\uparrow), n(\uparrow)$	$R_s(\uparrow), I_s(\uparrow), n(\uparrow)$
Kaminskii II	$R_s(\downarrow), I_s(\rightarrow), n^w(\uparrow)$	$I_s(\rightarrow), n^w(\uparrow)$	$I_s(\rightarrow)$
Kaminskii* II		$I_s(\uparrow), n(\uparrow)$	$I_s(\uparrow), n(\uparrow)$
Bohlin	$I_s(\rightarrow)$	$I_s(\downarrow), n(\wedge)$	$I_s(\rightarrow), n(\wedge)$
Lee	$R_s(\downarrow), I_s(\uparrow), n(\uparrow)$	$I_s(\uparrow), n(\uparrow)$	$I_s(\uparrow), n(\uparrow)$
Gromov	$R_s(\downarrow), I_s(\uparrow)$	$R_s(\uparrow), I_s(\uparrow), n^w(\downarrow)$	$R_s(\uparrow), I_s(\uparrow), n^w(\downarrow)$
Cheung	$R_s^w(\vee)$	$R_s(N), I_s(\downarrow), n(\downarrow)$	$R_s^w(N), I_s(\rightarrow), n(\downarrow)$
Mikhelashvili	$R_s(\uparrow), I_s(\downarrow), n^w(\downarrow)$	$R_s(\uparrow), I_s(\wedge), n^w(\downarrow)$	$R_s(\uparrow), I_s(\wedge), n^w(\downarrow)$
Ordinary LS	$R_s(\downarrow)$	$R_s(\uparrow), I_s^w(\downarrow), n^w(\downarrow)$	$R_s(\uparrow), n^w(\downarrow)$
Lambert LS	$R_s(\downarrow)$	$I_s^w(\downarrow)$	$n^w(\downarrow)$
EAs	$R_s(\downarrow), I_s^w(\uparrow)$	$R_s(\uparrow), I_s(\vee), n^w(\downarrow)$	$R_s(\uparrow), I_s(\vee), n^w(\downarrow)$

### 3.5.2 Швидкодія методів визначення параметрів ДШ

### 3.5.3 Вплив випадкових похибок на точність визначення параметрів структур МН

### 3.5.4 Визначення параметрів реальних структур МН

## Висновки до розділу 3

1. Проведено чисельний аналіз залежності величин похибок визначення ВБШ та послідовного опору в методі Норда від величини параметра  $\gamma_N$

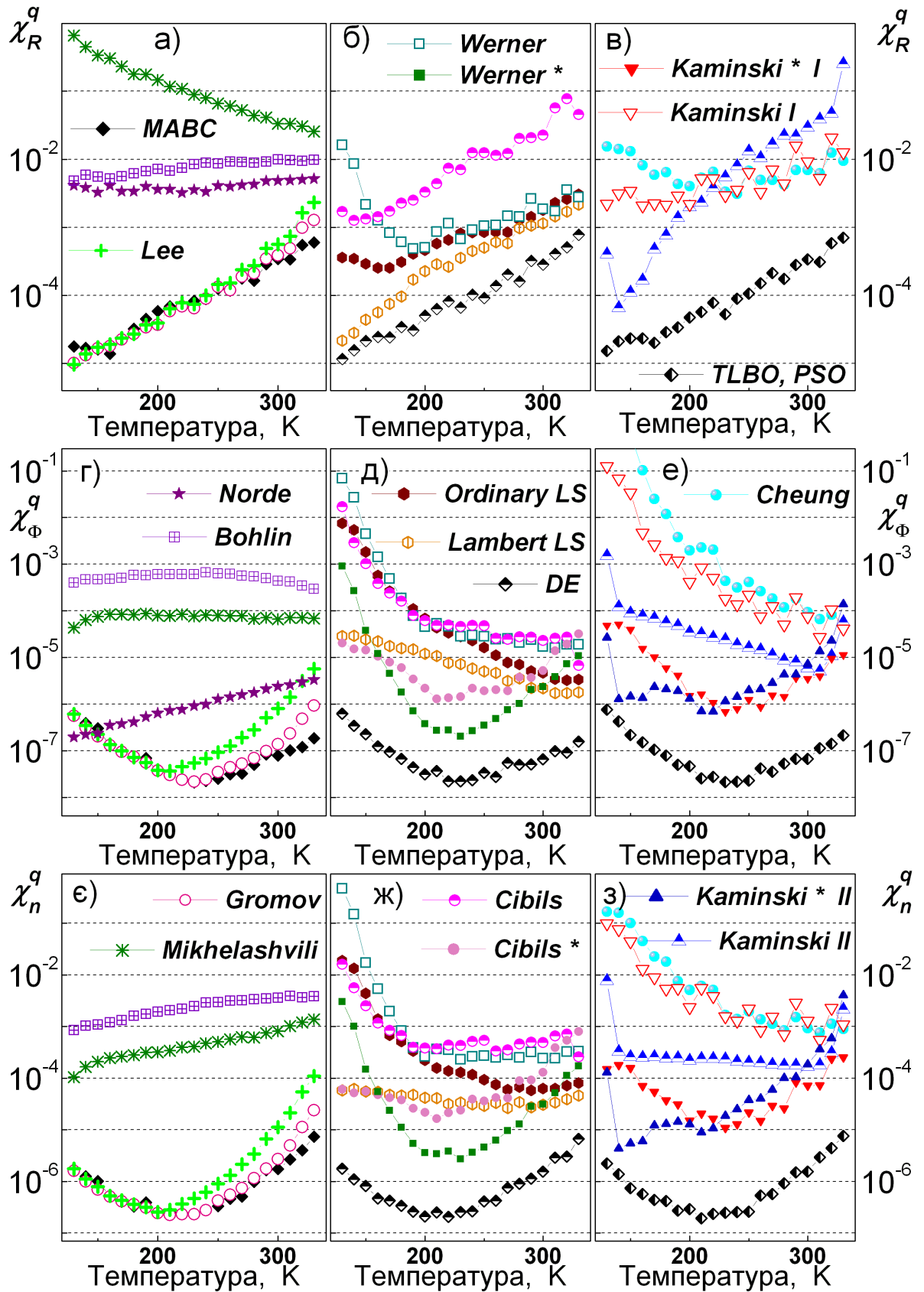


Рис. 3.10 — Залежності точності визначення послідовного опору (а — в), ВБШ (г — е) та фактору неідеальності (є — з) при використанні різних методів від температури. Результати отримані при використанні наборів зашумлених даних.

$$\sigma_V = 0,3 \text{ мВ}, \sigma_I^\varepsilon = 1\%.$$



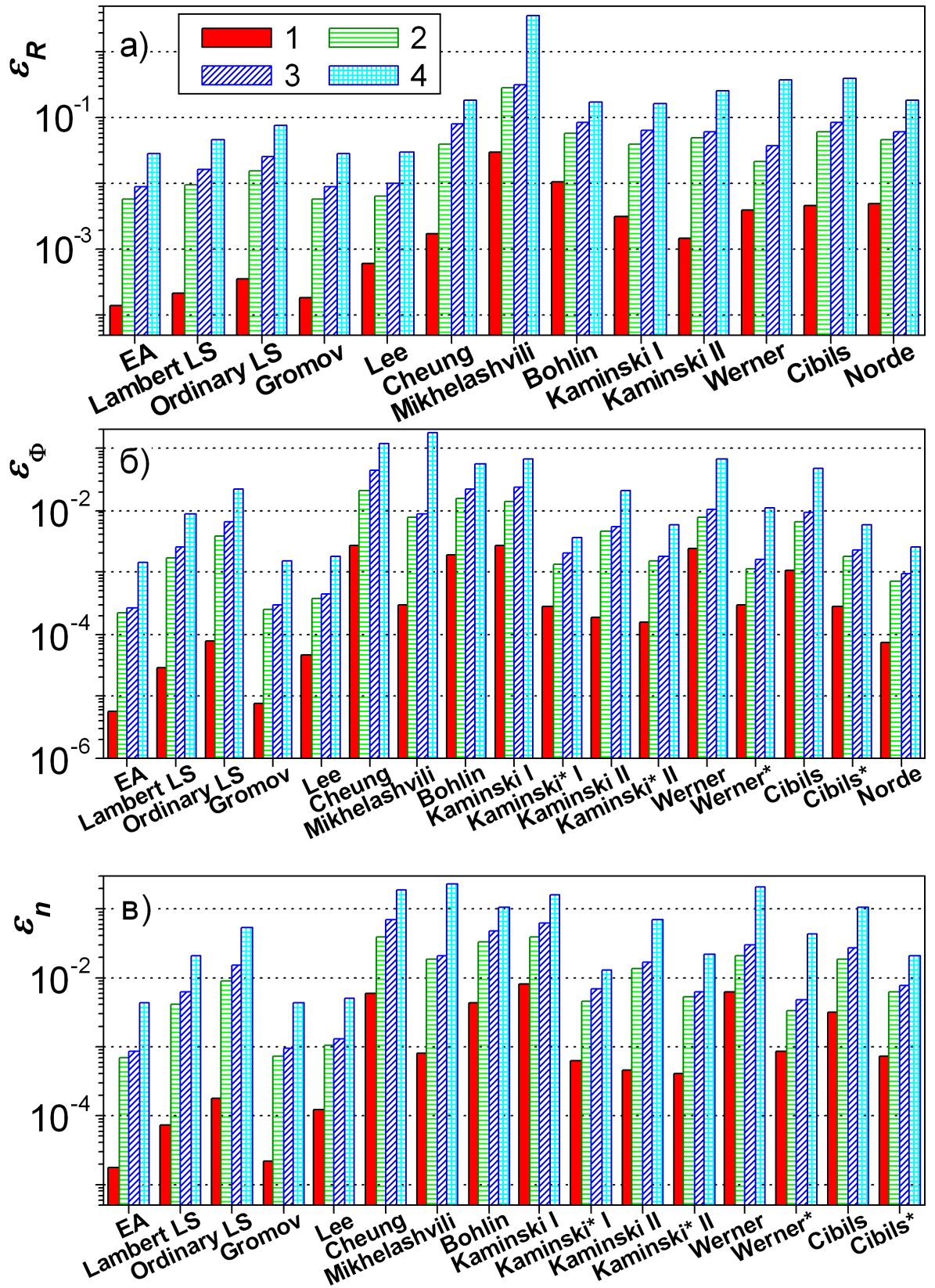


Рис. 3.11 — Точність визначення  $R_s$  (а),  $\Phi_b$  (б) та  $n_{id}$  (в) з наборів зашумлених даних.  $\sigma_V$ , мВ: 0 (1), 0,3 (2, 3), 2 (4).  $\sigma_I^\varepsilon$ , %: 0 (1), 0,5 (2), 1 (3, 4).

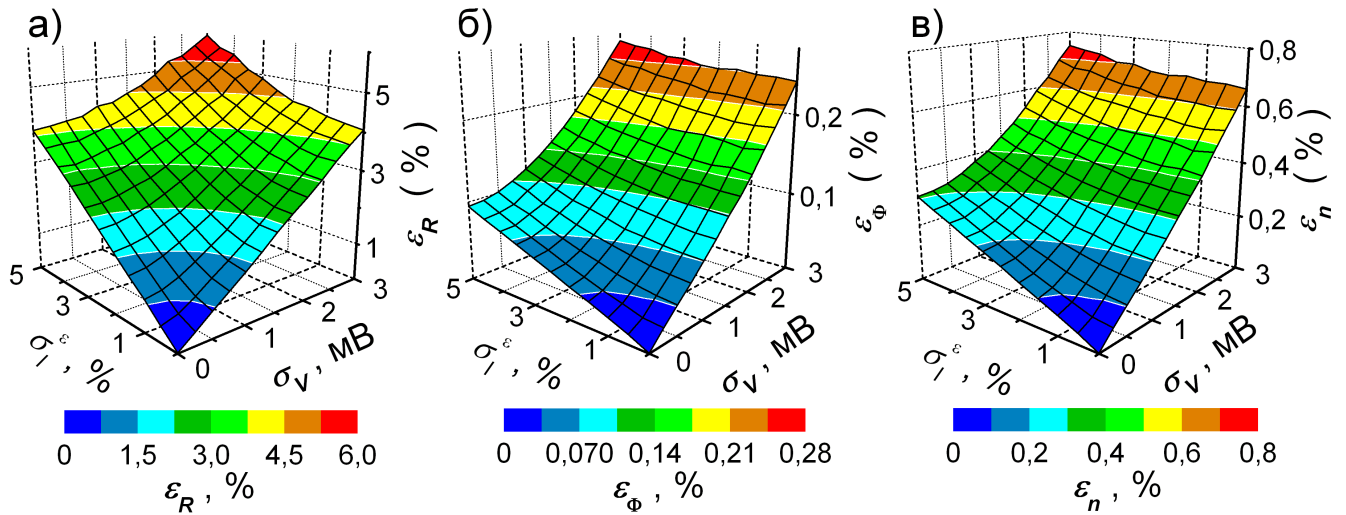


Рис. 3.12 — Залежності точності визначення  $R_s$  (а),  $\Phi_b$  (б) та  $n_{id}$  (в) при використанні методу Gromov від похибок вимірювання сили струму та напруги.

на масиві синтезованих ідеальних та зашумлених ВАХ. Виявлено, що похибка визначення висоти бар'єру зростає зі збільшенням параметру, тоді як залежність похибки оцінювання послідовного опору є немонотонною функцією  $\gamma_N$ . Показано, що найбільш оптимальним значенням є  $\gamma_N = 1,8$ .

2. Проведено чисельний аналіз залежності величин похибок визначення висоти бар'єру, фактору неідеальності та послідовного опору при використанні методу Бохліна від величин параметрів  $\gamma_1$  та  $\gamma_2$ . Виявлено, що похибка екстрагування параметрів зростає при збільшенні величини  $|\gamma_1 - \gamma_2|$ . Запропоновані оптимальні (для температурного діапазону  $130 \div 330$  K) величини  $\gamma_1 = 1,6$  та  $\gamma_2 = 3,5$ .
3. Запропоновано адаптивну процедуру для вибору діапазону ВАХ, який використовується для побудови допоміжних функцій при застосуванні аналітичних методів визначення параметрів структур МН. Показано її ефективність на прикладі методу Громова.
4. Запропоновано модифікацію методу Mikhelashvili, яка дозволяє застосовувати його в автоматичному режимі до набору ВАХ. Вона полягає у послідовному використанні медіанного фільтру та процедури згладжування функції  $\alpha(V) = d(\ln I)/d(\ln V)$  перед знаходженням положення її максимуму. Показано доцільність застосування запропонованої процедури для підвищення точності методу.

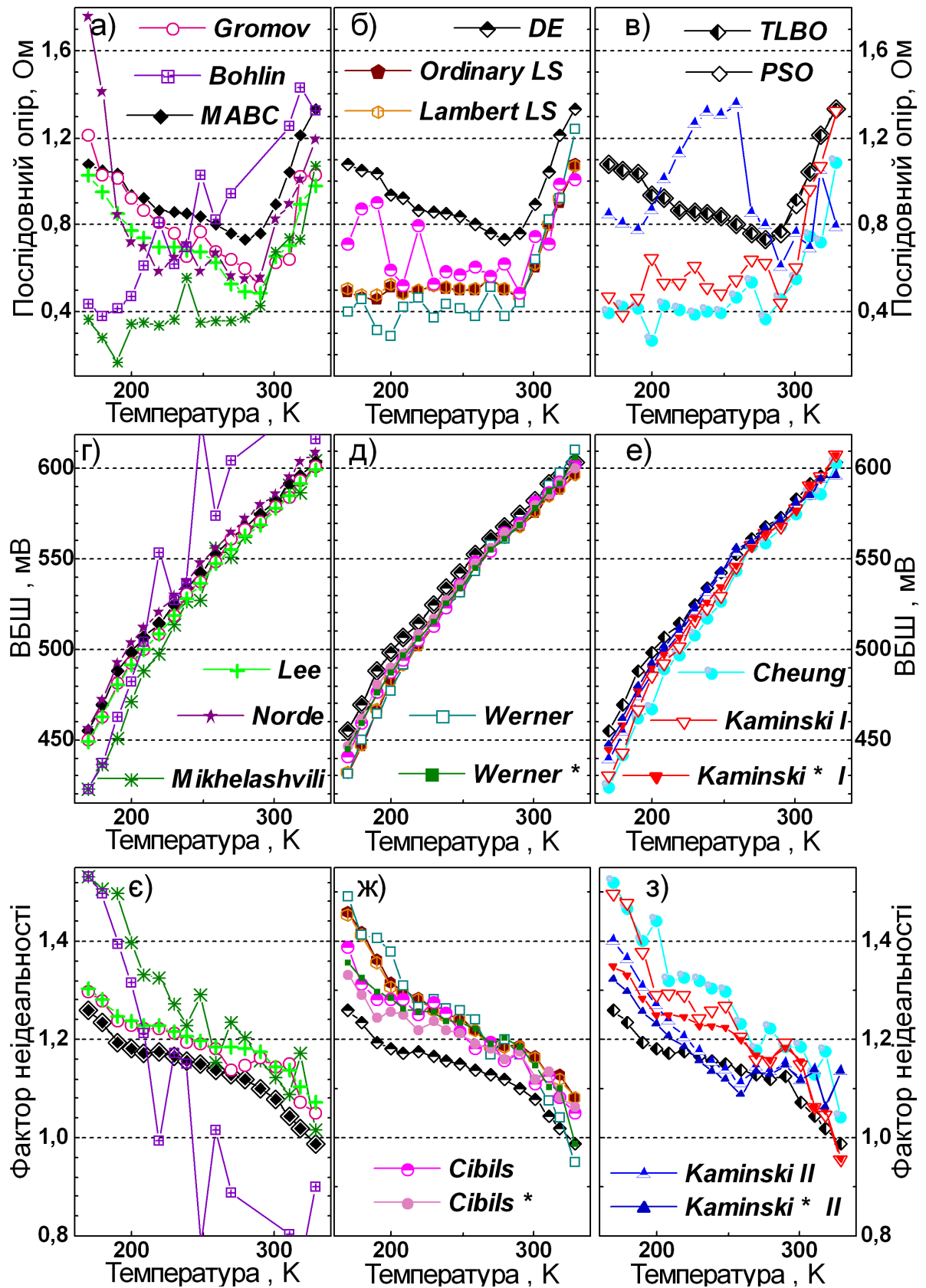


Рис. 3.13 — Залежності точності визначення послідовного опору (а — в), ВБШ (г — е) та фактору неідеальності (є — з) при використанні різних методів від температури. Результати отримані при використанні експериментальних ВАХ.



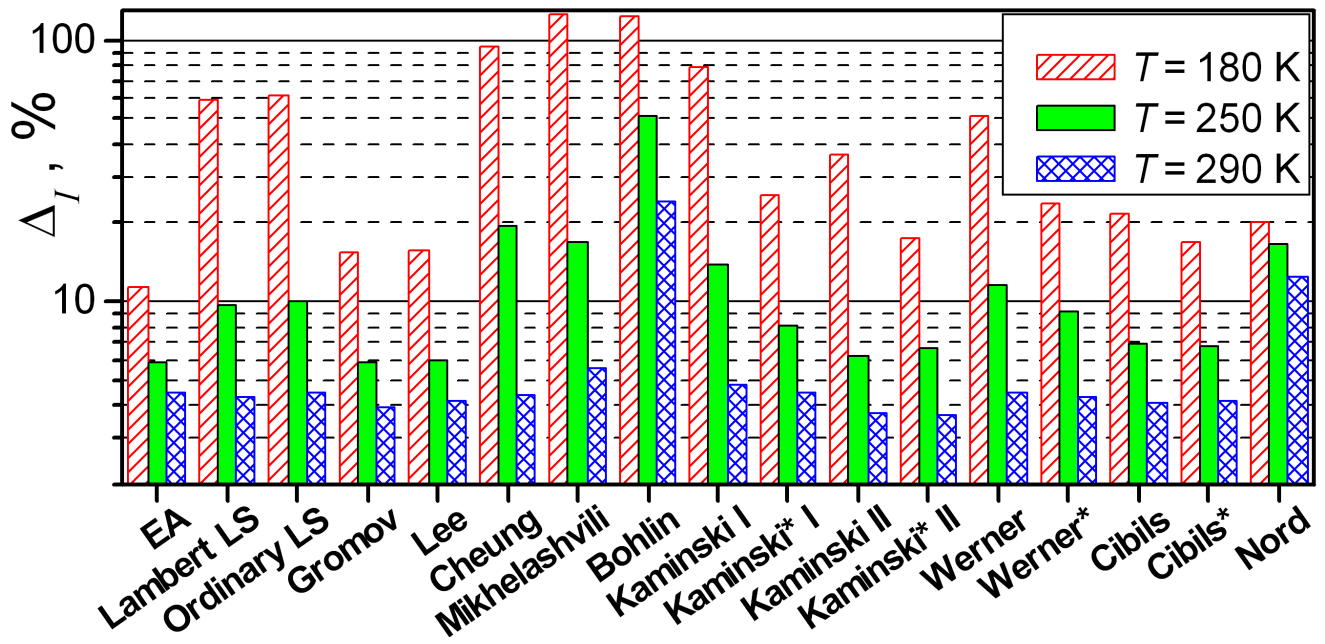


Рис. 3.14 — Середні значення відносного відхилення розрахованих значень сили струму від експериментальних даних.

- Здійснена програмна реалізація еволюційних алгоритмів диференційної еволюції, оптимізації зграї частинок, модифікованої штучної бджолиної сім'ї і оптимізованого викладання та навчання при вирішенні задачі визначення параметрів структур МН. Запропоновано та показано ефективність застосування цільової функції у вигляді суми квадратів відносних похибок апроксимації кожної з точок ВАХ. Проведено визначення необхідної кількості поколінь для збіжності кожного з алгоритмів.

Мы можем сделать **жирный текст** и *курсив*.

Сошлёмся на библиографию. [?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,  
?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?] Одна ссылка: [?, с. 54].