



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Коваль А. О.

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Конспект лекцій

Затверджено методичною
радою факультету, протокол №
1 від 7 «вересня» 2018 р.

Харків

2018

ТЕМА 1

ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Лекція 1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

1. Основні поняття та визначення

Вимірювальне перетворення. Згідно з Державним стандартом України ДСТУ2681-94 вимірювальне перетворення фізичної величини - це вимірювальна операція, під час якої вхідна фізична величина перетворюється у функціонально пов'язану з нею вихідну величину. Вимірювальне перетворення може відбуватися за умови, якщо відомі характеристики похибок перетворення (точність перетворення).

Фізичний ефект, на якому основане вимірювальне перетворення, називають *принципом вимірювального перетворення.*

Застосування вимірювальних перетворень як способу передавання вимірювальної інформації (інформації про значення вимірюваної величини) покладене в основу практичної побудови будь-якого вимірювального пристрою. Фізичною основою вимірювального перетворення є перетворення та передавання енергії, зокрема з перетворенням одного виду енергії в інший або ж без нього.

Сьогодні вимірювальне перетворення фізичних величин, зокрема неелектричних, здійснюється переважно як перетворення вимірюваної неелектричної величини в електричну. До основних переваг таких перетворень належать:

- універсальність, яка полягає в можливості вимірювань кількох чи навіть великої кількості неелектричних величин (із використанням відповідних сенсорів) за допомогою одного електричного вимірювального засобу; простота автоматизації вимірювань завдяки тому, що в електричних колах можна виконувати логічні та цифрові операції;

- можливість забезпечення високої чутливості, необхідної точності та швидкодії, зумовлена гнучкістю структури та простотою підсилення

електричних сигналів;

- дистанційність, що полягає у можливості вимірювань параметрів досліджуваних об'єктів практично на будь-якій відстані від них завдяки можливості передавання електричних сигналів через проводи лінії зв'язку чи через випромінювання електромагнітних хвиль.

Велика різноманітність вимірюваних фізичних величин, розкиданість досліджуваних об'єктів у просторі, необхідність автоматизації управління за централізованого отримання вимірювальної інформації, опрацювання останньої та вироблення сигналів для зворотної дії на об'єкт дослідження зумовлюють використання електричних методів вимірювань найрізноманітніших фізичних величин, оскільки електричні сигнали найпридатніші як для вимірювань, так і для опрацювання та передавання на відстань.

Вимірювання фізичних величин електричними вимірювальними засобами уможлиблюється після попереднього перетворення досліджуваних фізичних величин на функціонально зв'язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів. Отже, для вимірювань фізичних величин електричними методами насамперед потрібний *вимірювальний перетворювач*.

Згідно з Державним стандартом України ДСТУ 2681-94 *вимірювальним перетворювачем* (ВП) називають вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення, тобто перетворення вхідної фізичної величини у функціонально зв'язану з нею вихідну величину.

Вимірювальний пристрій (ВПП) - це засіб вимірювальної техніки, в якому виконується лише одна зі складових частин процедури вимірювань (вимірювальна операція).

Вимірювальний перетворювач, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання, називають *первинним вимірювальним перетворювачем*. Вихідні сигнали вимірювальних перетворювачів мають бути зручними для передавання, подальшого перетворення, оброблення і зберігання інформації.

Термін *давач*, яким часто замінюють термін «*вимірювальний перетворювач*», Державним стандартом не встановлений. Однак цей термін

широко вживають у технічній літературі. Під терміном *давач* (англ. sensor, нім. *meßgeber*, рос. датчик) розуміють окремих вид первинного вимірювального перетворювача, призначеного для перетворення вхідної вимірюваної величини у сигнал, зручний для подальшого перетворення, передавання, вимірювання та зберігання інформації про стан досліджуваного об'єкта.

Термін *сенсор* зазвичай ототожнюють із терміном *давач*.

Останнім часом усталилась тенденція до мініатюризації засобів вимірювальної техніки та появи мініатюрних сенсорів (*мікросенсорів*). Під терміном *мікросенсор* розуміють мініатюрний сенсор, в якого хоч би один із розмірів є у субміліметровому діапазоні. Подальше зменшення розмірів таких пристроїв у зв'язку із застосуванням нанотехнологій привело до появи *наносенсорів*.

Вимірювальні перетворювачі можуть реалізовуватись по-різному. У найпростішому варіанті - це первинні вимірювальні перетворювачі, метрологічні характеристики яких нормуються. Здебільшого на виході таких сенсорів отримують вимірювальну інформацію у вигляді електричної величини: активної (електрорушійної сили, струму) чи пасивної (активний опір, ємність, індуктивність). Відомі функціонально закінчені вимірювальні перетворювачі, до яких, окрім давача, входять вторинний електричний вимірювальний прилад, а також пристрої спряження (їх ще називають *вторинними вимірювальними перетворювачами* — лінії зв'язку, вимірювальні підсилювачі, пристрої гальванічного розділення, функціональні перетворювачі, пристрої корекції похибок тощо). Все частіше з'являються вимірювальні перетворювачі, котрі забезпечують вихідний сигнал у вигляді цифрового коду, тобто в яких використано обчислювальні компоненти і кодові засоби вимірювань.

Обчислювальним компонентом називають вимірювальний пристрій, що є сукупністю засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення і виконує обчислювальні операції під час вимірювання. *Кодовий засіб вимірювання* - це такий засіб вимірювання, у якому створюється кодовий сигнал вимірювальної інформації. Прикладом такого засобу є аналого-цифровий перетворювач.

Розвитком останнього виду вимірювальних пристроїв стали *інтелектуальні вимірювальні перетворювачі*. Під ними розуміють вимірювальні пристрої, що поряд із реалізацією вимірювального перетворення здійснюють первинне опрацювання вимірювальної інформації з метою її аналізу, корегування похибок вимірювання та можливого управління вимірювальною операцією.

Поняття "вимірювальний перетворювач" пов'язане з таким поняттям, як "засіб вимірювальної техніки", означення якого згідно з Державним стандартом таке:

Засіб вимірювальної техніки (ЗВТ) - це технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики.

Не слід вважати вимірювальний перетворювач засобом вимірювань, оскільки під *засобом вимірювань (ЗВ)* розуміють засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань. Зокрема, засобом вимірювань є *вимірювальний прилад*, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Вимірювальні перетворювачі стали основою для побудови *вимірювальних інформаційних систем*, що являють собою сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів контролю, діагностування та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної та інших видів інформації.

Елементи загальної теорії вимірювальних перетворювачів

Передавання і перетворення вимірювальної інформації у перетворювачах фізичних величин здійснюється через передавання та перетворення енергії. Такий підхід дав змогу академіку О. О. Харкевичу створити основи загальної теорії вимірювальних перетворювачів. Згідно з цією теорією будь-який вимірювальний перетворювач, для якого справедливий *принцип оборотності*, можна представляти як чотириполіусник зі сторонами, загалом різної фізичної природи, а перетворення вимірювальної інформації - як перетворення енергії одного виду в енергію іншого виду.

Звичайно, енергію будь-якої системи, за аналогією з механічними системами, можна подати добутком двох величин, однією з яких є сила, а іншою

- переміщення (координата). Вибір фізичних величин, які були б еквівалентні механічній силі та переміщенню, значною мірою умовний, але їх добуток повинен відповідати енергії як фізичній величині. Як узагальнені параметри можна прийняти також силу та швидкість (похідну переміщення за часом), добуток яких відповідає потужності як фізичній величині.

Щоб визначити зв'язок між силами та переміщеннями рухомої системи тіл, широко використовують рівняння Лагранжа другого роду. Ці рівняння дають змогу порівняно легко розв'язувати задачі динаміки зв'язаних систем.

Отримані для механічних систем рівняння Лагранжа застосовують і для інших, немеханічних систем. Зокрема, їх використав Д. Максвелл для вивчення електромагнітних явищ, В. Томсон (лорд Кельвін) для дослідження теплових явищ, внаслідок чого були створені відповідно теоретичні основи електродинаміки та теоретичні основи термодинаміки.

У найзагальнішому випадку в рівняннях Лагранжа як узагальнені координати можна прийняти будьякі фізичні величини, що визначають енергетичний стан системи. Це дає змогу застосовувати рівняння Лагранжа для аналізу роботи вимірювальних перетворювачів (ВП), вхідні та вихідні величини яких можуть бути величинами різної фізичної природи. Отже, вимірювальний перетворювач із двома каналами зв'язку (один вхід та один вихід, рис. 1.1), можна описати рівняннями Z -форми узагальненого пасивного чотириполюсника:

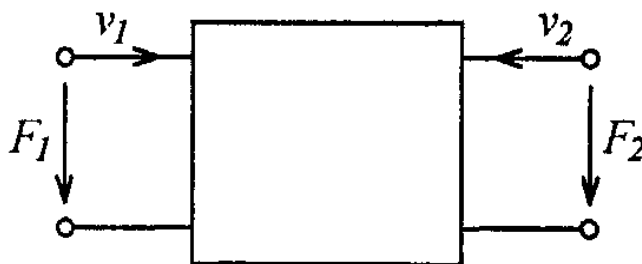


Рис. 1.1. Вимірювальний перетворювач як чотириполюсник

$$\begin{aligned} F_1 &= Z_{11} \cdot v_1 + Z_{12} \cdot v_2, \\ F_2 &= Z_{21} \cdot v_1 + Z_{22} \cdot v_2. \end{aligned} \quad (0.1)$$

Опори Z_{11} та Z_{22} визначаються як відношення відповідних узагальнених

сил до узагальнених швидкостей за умови відсутності руху ($v = 0$, режим неробочого ходу) на протилежній стороні. У режимі неробочого ходу визначають також опори Z_{X1} та γ_{21} . Отже, значення всіх цих опорів не залежать від властивостей наступних пристроїв, які можуть під'єднуватись до перетворювача, і характеризують лише властивості ВП. Відповідно до місця цих опорів у структурі перетворювача Z_{Π} та L_{22} називають власними

ТЕМА1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

1 Призначення та класифікація вимірювальних перетворювачів (ВП)

Жодна система управління не може працювати без інформації про стан об'єкта управління і його реакції на вплив управління. Елементом систем, що забезпечує отримання такої інформації, є вимірювальний перетворювач. Фахівці з метрології та автоматики частіше використовують терміни "первинний перетворювач (сенсор)" або "датчик". В подальшому термін "вимірювальний перетворювач" буде використовуватися в разі опису принципу дії того або іншого вимірювального пристрою, а термін "датчик" – стосовно його конструктивного виконання.

Автоматизація виробничих процесів, наукових експериментів і дослідів потребує все більшого об'єму вимірювань різноманітних фізичних величин. Про їх кількість можна робити висновки, розглядаючи систему одиниць СІ, яка містить більше 120 фізичних одиниць. Кількість типів вимірювальних перетворювачів значно перебільшує число вимірюваних величин, оскільки одну і ту ж фізичну величину можна вимірювати різними методами і давачами різних конструкцій.

Для більшості вимірювальних перетворювачів (ВП) характерно вимірювання електричними методами не тільки електричних і магнітних, але й інших фізичних величин. Ці вимірювання здійснюються попереднім перетворенням неелектричної величини в електричну. Такий підхід обумовлено перевагами електричних вимірювань, в першу чергу тим, що електричні сигнали можна легко і швидко передавати на великі відстані,

перетворювати в цифровий код, окрім того вони дозволяють забезпечити високу точність і чутливість.

Необхідно відмітити, що не завжди вимірювальний перетворювач виконує безпосередньо функції вимірювання. В ряді випадків ВП можна використовувати в якості перетворювача однієї фізичної величини в іншу, найчастіше з неелектричної в електричну. Наприклад, при вимірюванні рівня рідини поплавка в ємкості може бути ричажно зв'язаний з реостатним перетворювачем, ввімкненим в електричне коло. В цьому випадку зміна рівня, яка вимірюється переміщенням поплавка, буде перетворюватись в зміну електричного сигналу (напруги, струму).

Разом з широким розвитком і поширенням електричних методів і засобів вимірювання та управління розробляються і створюються засоби вимірювань і автоматизації, які використовують інші джерела енергії, — пневматичні, гідравлічні. Застосування пневматичних засобів автоматизації доцільно в небезпечних умовах експлуатації (в хімічній, нафтопереробній, харчовій промисловості та ін.), при недостатньому рівні кваліфікації обслуговуючого персоналу (пневматика простіша в обслуговуванні, ніж електроніка), для досягнення малої вартості засобів автоматизації.

Для ефективного функціонування ВП повинні відповідати ряду вимог, основні з яких:

- висока статична і динамічна точність роботи, що забезпечує формування вихідного сигналу з мінімальними викривленнями;
- висока вибірність – датчик повинен реагувати тільки на зміну тієї величини, для якої він призначений;
- стабільність характеристик у часі; відсутність впливу навантаження у вихідному колі на режим вхідного кола;
- висока надійність при роботі в несприятливих умовах зовнішнього середовища;
- повторюваність характеристик (взаємозамінність);

- простота і технологічність конструкції;
- зручність монтажу та обслуговування; низька вартість.

Бурхливий розвиток електронної промисловості призвів до прогресу і при розробці нових типів датчиків. На зміну електромеханічним і електровакуумним пристроям прийшли напівпровідникові в дискретному і інтегральному виконанні, оптоелектронні і інші пристрої. Вдосконалення напівпровідникової технології дозволяє розширити сфери використання давачів, збільшити їх точність, швидкодію, надійність, довговічність, зручність в поєднанні з електронними вимірювальними схемами. Масовий характер виробництва призводить до зниження їх ціни.

Загальні тенденції до мініатюризації і комп'ютеризації торкнулися і цієї області техніки. Разом з використанням інтегральної технології для виробництва самих давачів спостерігається тенденція об'єднання давачів з інтегральними перетворювачами аналогових сигналів в цифровий код для більш ефективного поєднання з засобами обчислювальної техніки і навіть конструктивне об'єднання давачів з мікропроцесорними пристроями.

2 Класифікація вимірювальних перетворювачів

В наш час існує багато різноманітних за принципом дії та призначенням ВП. Безперервний розвиток науки і технологій призводить до появи все нових перетворювачів. Розроблені класифікації допомагають розібратись в цьому різноманітті. Створити універсальну класифікацію, яка буде відповідати потребам всіх можливих користувачів конкретної предметної області, задача практично неможлива. Так, розробника систем управління, ймовірно, більш за все влаштовує класифікація давачів за видом вимірюваної фізичної величини, коли в довіднику він може знайти необхідний пристрій і ознайомитись з його основними характеристиками. Для розробника ВП, що вивчає конструкції і технології виготовлення ВП, більш доцільна класифікація перетворювачів за принципом їх дії. Тому зазвичай будь-яка класифікація багатовимірна, тобто

предмет класифікації розглядається за рядом ознак. При цьому чим більше ознак, тим більш глибоке уявлення можна отримати про предмет.

В якості *класифікаційних ознак* ВП можна прийняти більшість характеристик перетворювачів: вид функції перетворення, вид вхідної і вихідної величин, принцип дії, конструктивне виконання і т.д.

За видом енергії, що використовується, ВП можна поділити на:

- електричні;
- механічні;
- пневматичні;
- гідравлічні.

За співвідношенням між вхідною і вихідною величинами:

— неелектричних величин в неелектричні – перетворювачі розміру тієї або іншої неелектричної величини (важелі, редуктори) або перетворювачі виду вхідної величини (мембрани, пружини і т.д.);

— неелектричних величин в електричні – найбільш багаточисельна і розповсюджена група перетворювачів, якій буде приділено найбільше уваги;

— електричних величин в електричні;

— електричних величин в неелектричні – в основному вимірювальні механізми електромеханічних приладів.

В залежності від виду вихідного сигналу:

- аналогові;
- дискретні;
- релейні;
- з природним і уніфікованим вихідним сигналом.

За видом функції перетворення:

— масштабні, такі, що змінюють у визначене число разів розмір вхідної величини без зміни її фізичної природи;

— функціональні, що виконують однозначне функціональне перетворення вхідної величини зі зміною її фізичної природи або без зміни;

— операційні, що виконують над вхідною величиною математичні операції вищого порядку – диференціювання або інтегрування за часовим параметром.

За видом структурної схеми перетворювача:

- прямого однократного перетворення;
- послідовного прямого перетворення;
- диференціальні;
- зі зворотним зв'язком (компенсаційна схема).

За характером перетворення вхідної величини в вихідну:

- параметричні;
- генераторні;
- частотні;
- фазові.

За видом вимірюваної фізичної величини:

- лінійних і кутових переміщень;
- тиску;
- температури;
- концентрації речовин;
- вологості і т.д.

За фізичними явищами, покладеними в основу принципу дії, в державній системі приладів та засобів автоматизації (ДСП) прийнята така класифікація:

- механічні – з пружним чутливим елементом, дросельні, ротаметричні, об'ємні, поплавкові, швидкісні;
- електромеханічні – тензорезистивні, термоелектричні, термомеханічні, термокондуктометричні, манометричні;
- електрохімічні – кондуктометричні, потенціометричні, полярографічні;
- оптичні – фотоколометричні, рефрактометричні, оптико-акустичні, нефелометричні;

— електронні і іонізаційні – індукційні, хроматографічні, радіоізотопні, магнітні.

За динамічними характеристиками ВП розподіляються у відповідності з видом передаточної функції. В залежності від *виду статичної характеристики* ВП поділяють на реверсивні (двотактні) і нереверсивні (однотактні).

Навіть настільки розгорнута класифікація за рядом ознак не є вичерпною, оскільки за кожним визначенням стоїть група перетворювачів з різними технічними та конструктивними характеристиками.

3 Фізичні явища, що використовуються в ВП

При створенні ВП можна використовувати будь-які фізичні явища. Задача полягає в розробці на їх основі принципів дії перетворювачів і доведення їх до конкретних методів і конструкцій, що забезпечують, в першу чергу, необхідні метрологічні характеристики в заданих умовах застосування. В наш час розробляються банки фізичних явищ і ефектів, на підставі яких можна утворювати нові і модернізувати вже існуючі засоби і методи вимірювань.

Принцип дії параметричних перетворювачів полягає в перетворенні неелектричних вхідних величин в параметри електричного кола: опір R , індуктивність L , ємність C , взаємоіндукція M . Для живлення цих перетворювачів потрібні зовнішні джерела. До параметричних перетворювачів відносять резистивні, індуктивні, трансформаторні і ємнісні перетворювачі. Їх широко використовують для перетворення неелектричних величин (переміщення, зусилля, тиску, температури і інших) в величини, що відносяться до електричного кола (напругу, струм, частоту і інші).

Генераторні перетворювачі перетворюють вхідні величини в е.р.с.(електро-рушійну силу). Вони не потребують енергії додаткових джерел живлення, оскільки перетворюють енергію вхідного сигналу в вихідний сигнал.

Найбільше застосування на сьогодні отримали індукційні, термоелектричні, п'єзоелектричні, фотоелектричні перетворювачі.

Існує ряд перетворювачів, які можуть бути і параметричними, і генераторними. До них відносяться фазові і частотні перетворювачі. Фазові перетворювачі (фазообертачі) перетворюють вхідну величину в фазовий зсув вихідного змінної напруги. Фазовий зсув відраховується від опорної напруги, в якості якої найчастіше приймається напруга живлення. Використовуються фазові перетворювачі для вимірювання як електричних, так і неелектричних величин.

Частотні перетворювачі розподіляються на позиційні і коливальні. Позиційні частотні перетворювачі мають зазвичай укріпленій на осі ротора об'єкта профільований диск, який при своєму обертанні модулює сигнал в колі параметричного перетворювача або генерує сигнал у вихідному колі. В коливальних частотних перетворювачах використовуються властивості коливальних систем різної фізичної природи.

ТЕМА1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

ЛЕКЦІЯ 2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

1 Структурні схеми ВП

Не зважаючи на всю багатогранність ВП, їх структурні схеми можна привести до обмеженого числа (табл. 1.1).

Типові структурні схеми вимірювальних перетворювачів

Структурна характеристика

Статична характеристика

Похибка перетворення

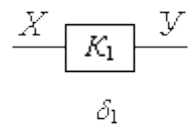


Схема прямого (одноразового) перетворення

$$Y = K_1 X$$

$$d_{II} = d_1$$

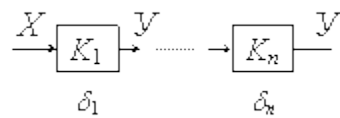
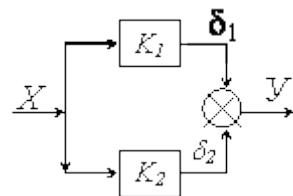


Схема послідовного прямого перетворення

$$Y = \prod_{i=1}^n K_i X$$

$$\delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i$$

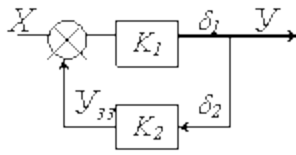


Диференціальна схема

$$Y = (K_1 - K_2) X$$

$$\delta_n = \delta_1 \frac{K_1}{K_1 + K_2} + \delta_2 \frac{K_2}{K_1 + K_2}$$

Схема зі зворотним зв'язком (компенсаційна схема)



$$Y = \frac{K_1}{1 + K_1 K_2} X$$

$$\delta_x = \delta_1 \frac{1}{1 + K_1 K_2} - \delta_2 \frac{1}{1 + 1/K_1 K_2}$$

Примітка. В формулах прийнято такі позначення:

X – вимірювана величина; Y – вихідна величина;

d_i – похибка ланки перетворювача; d_{II} – загальна похибка перетворювача;

K – коефіцієнт перетворення ланки.

Структурна схема прямого одноразового перетворення реалізується в багатьох перетворювачах з природними вихідними сигналами, наприклад, в термопарах, давачах тиску і розрядження, в яких вимірювана величина перетворюється безпосередньо в електричний сигнал, переміщення або підсилення. Статична характеристика, похибка і інші властивості повною мірою визначаються параметрами найчутливішого елемента.

В тих випадках, коли первинне перетворення не дозволяє отримати зручний або потрібний для подальшого використання сигнал, використовують структурні схеми з декількома послідовними перетворювачами, наприклад, при необхідності отримати уніфікований вихідний сигнал, при перетворенні неелектричної величини в електричну, при необхідності корекції статичної або динамічної характеристики перетворювача. Сумарний коефіцієнт перетворення (загальна чутливість), який дорівнює добутку коефіцієнтів перетворення окремих ланок ВП, можна отримати досить високим, але при цьому збільшується загальна похибка перетворення, тому що вона дорівнює сумі похибок ланок, що складають ВП.

В давачах, які побудовані за диференціальною схемою, вимірювана величина подається одночасно на два ідентичних вимірювальних перетворювачі. Вихідний сигнал давача пропорційний різниці вихідних сигналів ВП кожного з каналів. Якщо вихідні сигнали мають однакові знаки, то засіб порівняння виконує операцію віднімання, якщо знаки різні, то додавання.

До переваг диференціальних схем побудови давачів слід віднести: значне зменшення адитивних (постійних) складових загальної похибки, які обумовлені впливом збурюючих факторів; збільшення чутливості вдвічі при подачі вхідного сигналу на обидва входи; отримання реверсної статичної характеристики; зниження нелінійності статичної характеристики і постійної складової вихідного сигналу в порівнянні з характеристиками окремих ВП, які входять в диференціальну схему.

Найбільш досконала схема ВП – це схема зі зворотним зв'язком, або компенсаційна схема. В давачах, побудованих за цією схемою, забезпечується автоматична рівновага контрольованої величини, яка компенсується величиною того ж роду безпосередньо або після попереднього перетворення. Головна перевага такої схеми полягає в її здатності компенсувати значну зміну параметрів вимірювального тракту. Крім того, основна частина енергії, яка потрібна для роботи давача, береться від додаткових джерел, а не від вимірювального елемента.

Перетворювачі з від'ємним зворотним зв'язком принципово точніші, ніж схема прямого послідовного перетворення. Від'ємний зворотний зв'язок суттєво зменшує вплив похибок ланок прямого кола на результат перетворення. Будь-які помилки і збурення ланки, що не охоплена зворотним зв'язком, повною мірою передаються на вихід перетворювача, тому при побудові ВП доцільно прагнути того, щоб охопити зворотним зв'язком якомога більше ланок. При величині $K_1K_2 = 20,30$ (що неважко забезпечити на практиці) загальна похибка перетворювача практично визначається тільки похибкою d_2 зворотного зв'язку, внаслідок чого вимоги до похибки d_1 прямого каналу можна значно знизити (див. таб. 1.1).

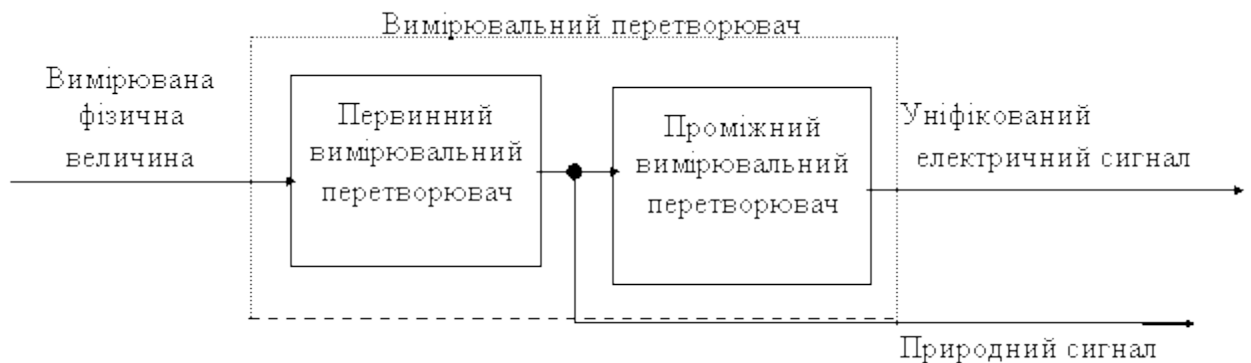


Рис. 1.1. Спрощена схема ВП з природним і уніфікованим виходами

Давачі зі зворотним зв'язком мають високу чутливість, дозволяють легко змінювати параметри настройки шляхом зміни коефіцієнтів перетворення зворотного кола.

Структурні схеми реальних ВП можуть являти собою будь-яку комбінацію з розглянутих вище типових структур. В колі послідовного перетворення вимірюваного сигналу прийнято розрізняти первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) і

проміжні перетворювачі (рис. 1.1.). Вимірювана величина впливає безпосередньо на первинний перетворювач. Дуже часто метод первинного перетворення вхідної величини визначає найменування всього вимірювального перетворювача або пристрою. Проміжні перетворювачі можуть виконувати функції підсилення, лінеаризації, перетворення роду сигналу і ін. Зокрема, на рис. 1.1. представлена спрощена схема ВП з природним і уніфікованим виходами.

Для того щоб за допомогою існуючих засобів можна було складати складні інформаційні системи (керування, вимірювання), необхідно, в першу чергу, забезпечити інформаційну сумісність технічних засобів. З цією метою спочатку були уніфіковані, а потім стандартизовані вихідні сигнали ВП.

За виглядом вихідних сигналів розрізняють вимірювальні перетворювачі з природним і уніфікованим вихідними сигналами. Перші являють собою пристрої, в яких здійснюється первинне (зазвичай одноразове) перетворення вимірюваної фізичної величини. Природне формування сигналу забезпечується методом перетворення та конструкцією ВП. Такі перетворювачі найчастіше використовують в пристроях прямого регулювання або при централізованому контролі відносно простих об'єктів.

Для створення відносно складних систем з використанням ЕОМ, при необхідності передачі сигналів на великі відстані використовують перетворювачі природних сигналів в уніфіковані. Для цієї мети розробляються спеціальні нормувальні перетворювачі, параметри вихідних сигналів яких приведені на рис. 1.2.

Окрему групу складають перетворювачі з дискретним релейним вихідним сигналом, які мають на виході контактну групу, що змінює своє положення при досягненні вимірюваною величиною заданого значення. Їх використовують для позиційного регулювання і сигналізації.

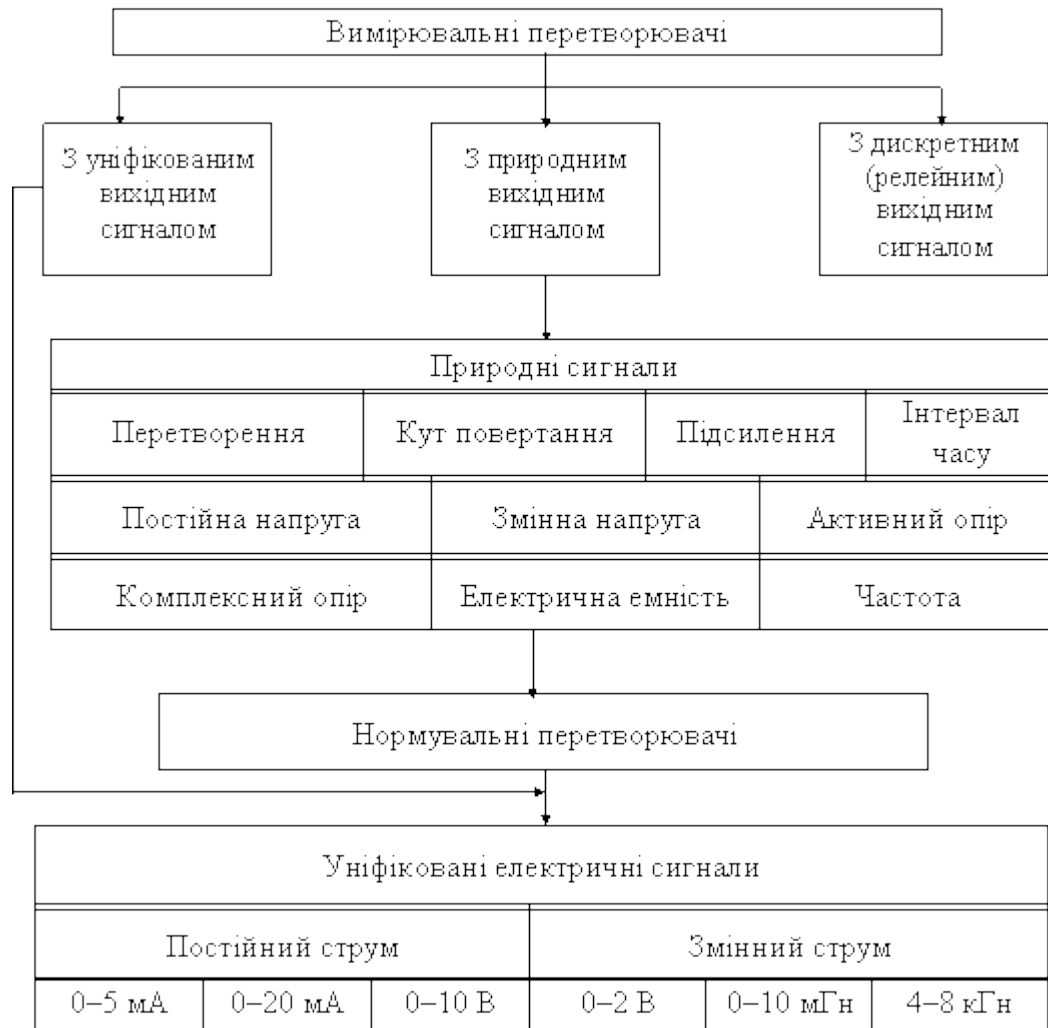


Рис.1.2. Параметри вихідних сигналів нормувальних перетворювачів

12 РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ЗМІНИ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКІВ ТИСКУ

В процесі визначення ДХ ВКТ з використанням нейронної мережі виникає задача автоматичного визначення ступеню подібності вимірних сигналів, тобто визначення метрики (відстані між сигналами).

Найбільш простий клас метрик порівняння сигналів на виході ВКТ - це порівняння вимірних сигналів за їх формою для кожного моменту часу. Наприклад, можна порівнювати максимальне відхилення амплітуд сигналів, але така метрика чутлива до одиничних відмінностей в амплітудах сигналів:

$$U = \max_i |a_i - b_i|, \quad (12.1)$$

де вектори a_i і b_i - значення амплітуд порівнюваних вхідних дій (сигналів) ВКТ.

Іншим критерієм оцінки може служити середньоквадратичне відхилення амплітуд сигналів:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{n}}, \quad (12.2)$$

де n - кількість вимірів в часовій вибірці вхідного сигналу. Даному методу властиві недоліки:

— висока чутливість до середньої відмінності сигналів по амплітуді, що може привести до помилкового результату, у випадку, коли сигнали незначно відрізняються в середньому по амплітуді;

— вимірювальний канал має різну чутливість до спотворень вхідного сигналу у різних частинах частотного діапазону, що пов'язано з амплітудно-

частотною характеристикою вимірювального каналу тиску. З цього випливає, що спотворення порівнюваних сигналів на низьких (0.001-5 Гц) і середніх частотах (5-20 Гц) будуть більшими, ніж на високих (20-50 Гц).

Таким чином, дана метрика не може враховувати різну чутливість ВКТ в різних частотних смугах, а при порівнянні двох різних сигналів з білим шумом швидше за все дасть висновок про те, що вони зовсім різні.

Іншим підходом є частотно-часова метрика вхідних сигналів ВКТ. Для одержання даної метрики вхідні сигнали спочатку послідовно покриваються невеликими інтервалами з деяким кроком dt в часі. У кожному із цих інтервалів сигнал розкладається в ряд Фур'є, після чого будується спектр (без врахування фаз частотних складових). Отримані спектри записуються у двовимірний масив (час, частота) - спектрограму.

Перевагою даної метрики над описаною вище є те, що можна порівнювати значення амплітуд сигналів згідно з даними про сприйняття ВКТ тієї або іншої частотної складової, тобто робити порівняння за формулою:

$$\sigma_u = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_F} \frac{1}{\alpha_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} (Sa_{ji} - Sb_{ji})^2}}{N_F \cdot N_T} \quad (12.3)$$

де Sa_{ji} , Sb_{ji} - двовимірні масиви амплітуд спектрограм двох вхідних сигналів a і b .

Коефіцієнт α_j залежить від чутливості ВКТ в даній j -тій частотній ділянці амплітудно-частотної характеристики каналу тиску, значення для якої отримуються експериментально.

Для даного методу, як і для амплітудно-часової метрики, так само необхідно, щоб сигнали містили однакову енергію, тобто середньоквадратичне відхилення в спектрах для всього сигналу повинне бути мінімальним. У порівнянні зі звичайною метрикою в даній мірі практично вирішується

проблема порівняння сигналів з різними амплітудами й ураховується нерівномірною чутливістю ВКТ до різних частотних складових.

Для тестування цього методу визначення метрики вхідних сигналів ВКТ більш правильно застосовувати модифікацію даного методу: зі спектрограми послідовно виділяється кілька k частотних смуг і в них визначається середньоквадратичне відхилення. Частотні смуги вибираються неоднакової ширини, тому що змістовної інформації для технологічного процесу ВКТ в межах 0-5 Гц більше, чим у межах 20-40 Гц, отже й смуги в низькочастотній області вибираються вужчими, ніж у високочастотній.

$$\sigma_k = \frac{\sqrt{\sum_{j=N_{F \min}}^{N_{F \max}} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} (S a_{ji} - S b_{ji})^2}}{(N_{F \max} - N_{F \min}) \cdot N_T}. \quad (12.4)$$

Перевагою даного методу є те, що стає можливим порівняння вхідних сигналів ВКТ, оброблених фільтром низьких частот для зменшення кількості вимірювальної інформації. Такі сигнали можна порівнювати тільки в тих частотних смугах, які характерні для даного сталого режиму роботи ТСО. Також у цьому випадку не обов'язково зберігати енергію сигналів у всьому частотному діапазоні при переході від одного сталого режиму ТСО до другого. При коректному збереженні енергії сигналу в частотній смузі можна досить точно визначити середню відмінність сигналів в цій смузі. Одним з недоліків методу є мала розрізнявальна здатність як по частоті, так і за часом.

Для зменшення впливу цього недоліку на якість роботи нейронної мережі весь частотний діапазон вхідного сигналу ВКТ розбивається на декілька n смуг. В залежності від їх значимості для характеристики технологічного процесу та точності вимірювання тиску в каналі ТСО ширина кожної смуги dF_n різна. Аналогічним чином весь часовий інтервал аналізу подібності вхідних сигналів розбивається на m підінтервалів часу з різною шириною dT_m , в межах

яких буде проводитись порівняння сигналів. Таким чином, можна отримати середнє відхилення між вхідними сигналами ВКТ в області розміром $n \times m$:

$$\sigma_{nm} = \frac{\sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^m |Sa_{ji} - Sb_{ji}|}{dF_n \cdot dT_m}. \quad (12.5)$$

З точки зору реалізації пошуку екстремуму зручніше оцінювати не мінімуми σ_{nm} , а максимуми $1/\sigma_{nm}$. Аналіз метрики відновленого сигналу нейромережевим алгоритмом та опорного вхідного сигналу за критерієм максимуму $1/\sigma_{nm}$ дає можливість визначити ДХ ВКТ у полі аналізу. Вихідний сигнал ВКТ характеризується декількома частотними складовими. Для кожного сталого режиму роботи ТСО кількість цих складових різна. Характерним є наявність як амплітудних, так і частотних флуктуацій як в межах одного, так і при переході до іншого сталого режиму ТСО. Хоча ці флуктуації, на перший погляд, і не значні, але це приводить до того що метрика σ_{nm} порівнюваних вхідних дій (фактично їх енергія) буде розподілена в декількох елементах аналізу, що значно ускладнює пошук екстремуму $1/\sigma_{nm}$. Як наслідок, зростає час та похибка навчання нейронної мережі, в окремих випадках нейронна мережа взагалі не може навчитися. На рис. 12.1 зображено ізолінії відображення одної з реалізацій відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при навчанні нейронної мережі. Такий вид метрики аналізованих вхідних дій є характерним при малому відношенні сигнал/шум ($q < 7$ дБ) або при тривалості квазістаціонарної часової вибірки менше 1 хвилини. Для усунення цього недоліку запропоновано визначення метрики аналізованих вхідних дій проводити в два етапи. На першому етапі двомірним ковзаючим вікном в площині "час-частота" проводиться грубий пошук екстремуму. При його знаходженні проводиться точне визначення елементів аналізу шляхом одночасного часово-частотного аналізу в часовому та

частотному стробі. Спочатку одночасно оцінюються всі максимуми, які попали в строб часу, і якщо знайдений за результатами грубої оцінки є дійсно найбільшим максимумом, то далі проводиться його уточнення частотним стробом. Таким чином усувається неоднозначність оцінки критерію зупинки навчання нейронної мережі. Нейронна мережа функціонує як обернений оператор, коли по вихідному сигналу ВКТ отримується вхідна дія та ДХ каналу тиску (рис. 12.7). Таким чином, після перестроювання визначається ДХ зразкового ВКТ або його моделі. Порівняння цієї характеристики з наперед відомою характеристикою зразкового ВКТ дозволяє оцінити точність визначення ДХ і якість роботи нейронної мережі. Після навчання на нейронну мережу подається вихідний сигнал реального ВКТ з невідомими ДХ. Цей сигнал при навчанні не подавався, але, оскільки нейронна мережа отримала функцію узагальнення при навчанні, то вона в автоматичному режимі майже в реальному часі дозволяє визначити постійну частоту та динамічні характеристики реального каналу. Результати роботи інверсної моделі ВКТ приведені на рис. 12.1...12.6. Оцінка якості відновлення вхідної дії ВКТ його нейромережевою моделлю оцінювалась методом порівняння отриманих результатів методом розв'язання оберненої задачі вимірювань за одним і тим же вихідним сигналом ВКТ. На рис. 12.7а зображено відновлену вхідну дію каналу тиску, що отримана методом розв'язання оберненої задачі вимірювань, а на рис.12.7б - нейромережевим алгоритмом. На рис. 12.8 приведені відповідні спектри відновлених вхідних дій. Видно, що нейромережева модель ВКТ відновлює вхідну дію з меншим рівнем високочастотних складових, що є результатом низькочастотної фільтрації моделюючого нейромережевого алгоритму.

Час навчання визначається заданим рівнем точності та фактичним терміном експлуатації ВКТ (рівнем впливу нестационарності на ПФ каналу). Функція похибки навчання щодо своїх аргументів – вагових коефіцієнтів нейромережевої моделі ВКТ – є багатомірним параболоїдом, тому вона має єдиний мінімум, що близький до нуля. З метою оцінки ефективності використання нейромережевого методу визначення ДХ було досліджено ВКТ з

річним терміном експлуатації. Постійна часу ВКТ, що визначена нейромережевим методом, склала 105 мс, а за результатами натурального експерименту – 94.5 мс.

Таким чином, відносна похибка визначення постійної часу дорівнює 12%. Алгоритм був досліджений при різних вхідних даних та відношеннях сигнал/шум і показав високу стійкість. В роботі проведено порівняльний аналіз похибок вимірювань постійної часу ВКТ методом внутрішнього контролю та з використанням нейромережевої моделі каналу. Порівняння проводились для величини відношення сигнал/шум на виході ВКТ 10 дБ. Встановлено, що величина похибки залежить від часу роботи відповідного алгоритму та відношення сигнал/шум. Так, при відношенні сигнал/шум 10 дБ відносна похибка визначення постійної часу ВКТ лежить в межах: для методу внутрішнього контролю – 13%; для методу з використанням нейромережевих технологій – 11%. Час встановлення стабільної похибки визначення постійної часу ВКТ тиску склав: для методу внутрішнього контролю – 30 хвилин (1800 с), а для методу з використанням нейромережевих технологій – 8 хвилин (500 с) без попереднього навчання і 18 с з попереднім навчанням.

Отже, найбільш швидкодіючим методом визначення постійної часу ВКТ є метод з використанням нейромережевих технологій, який забезпечує визначення постійної часу каналу з відносною похибкою не більше 11% в майже реальному масштабі часу. В роботі також оцінена ефективність використання нейромережевого методу визначення постійної часу вимірювального каналу (рис. 12.9а).

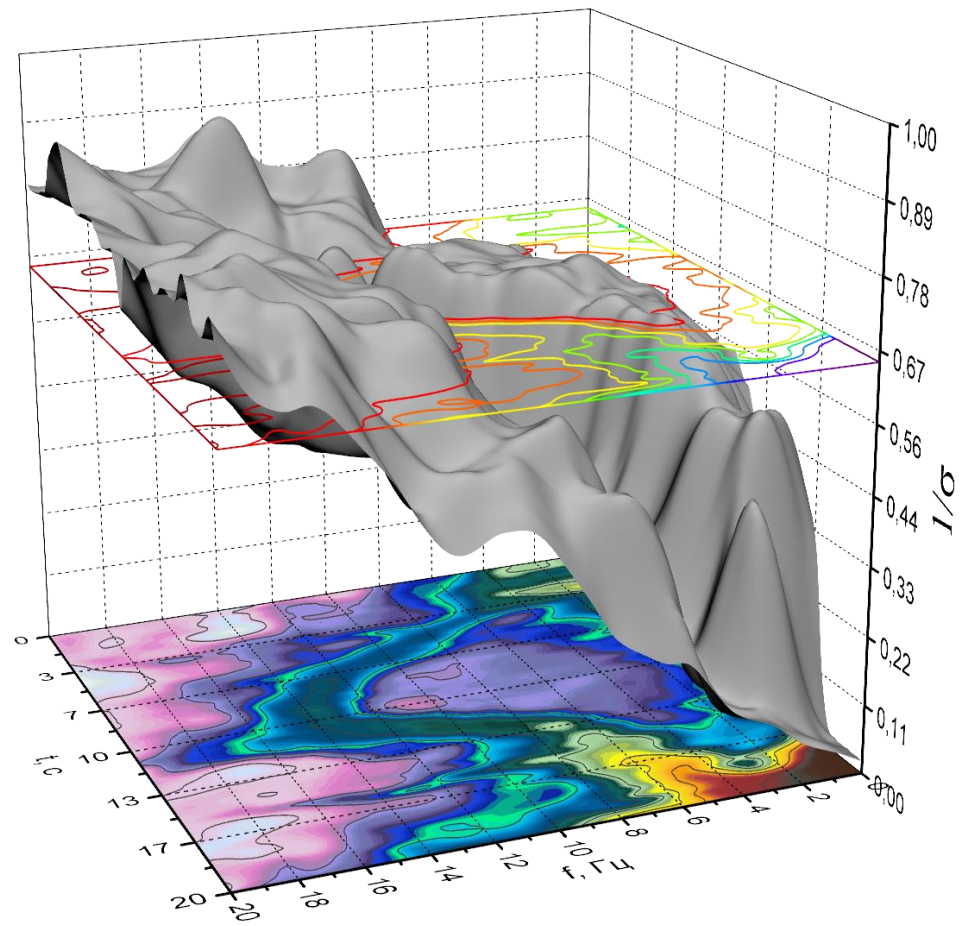


Рисунок 12.1 – Формування відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при навчанні нейронної мережі

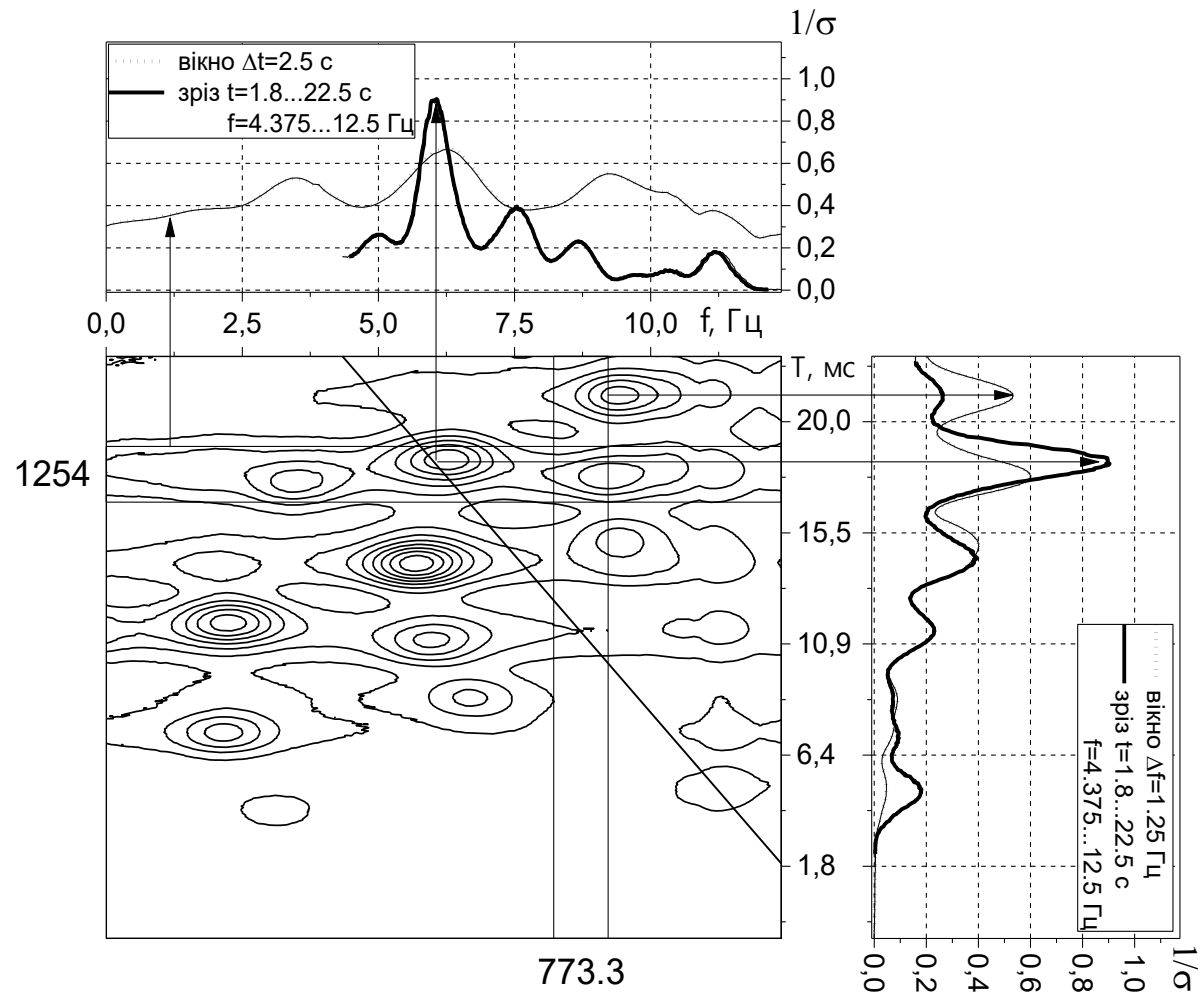


Рисунок 12.2 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

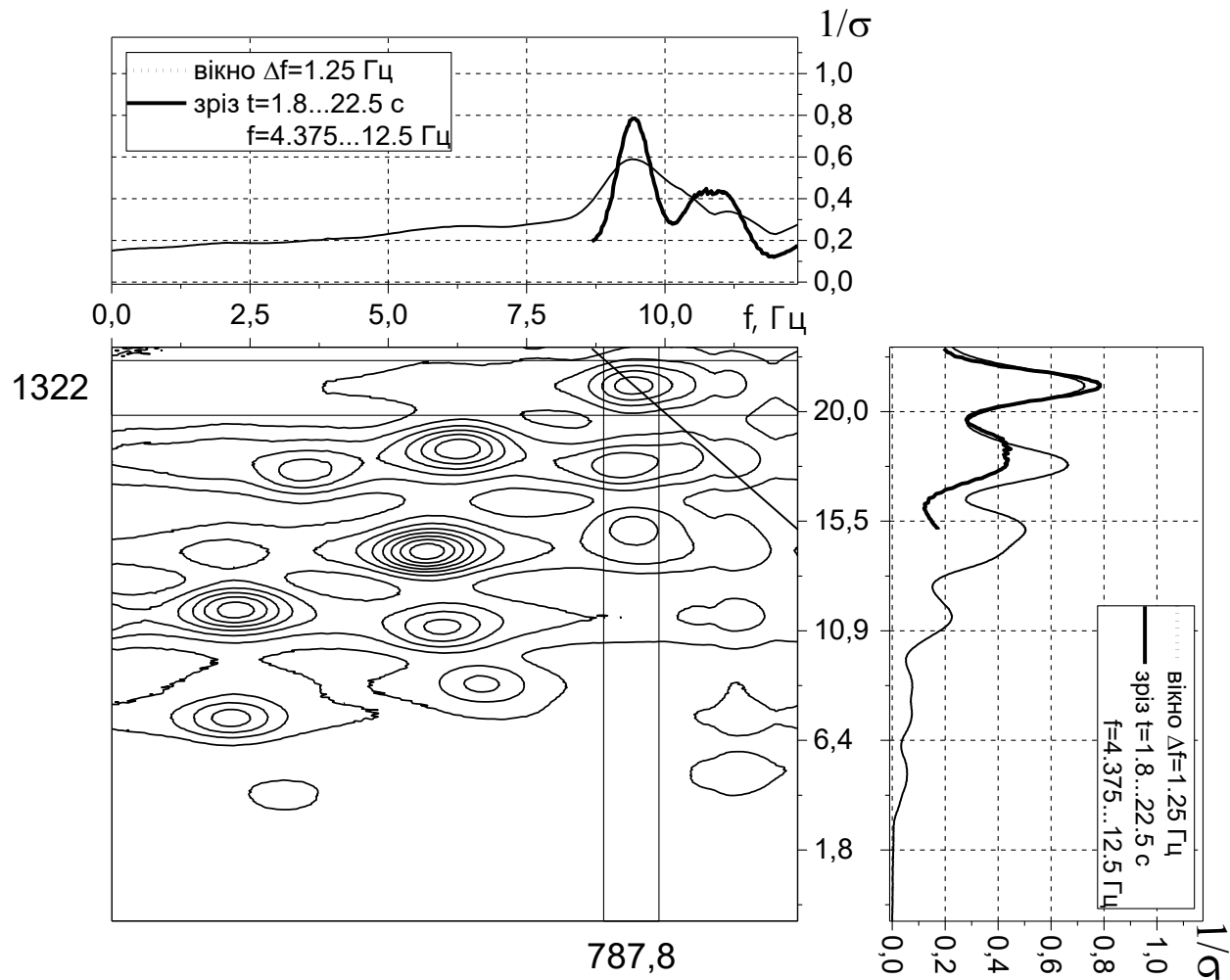


Рисунок 12.3 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

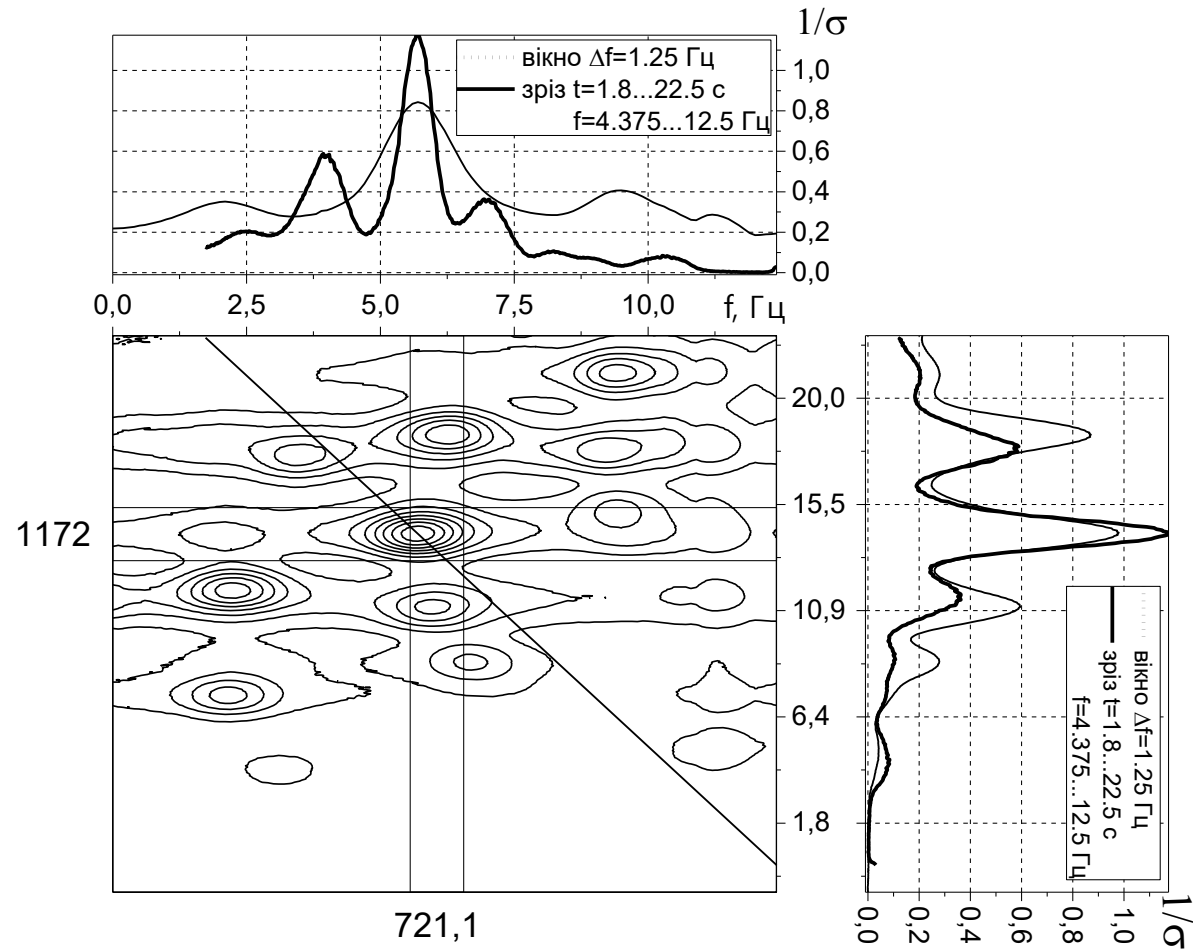


Рисунок 12.4 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

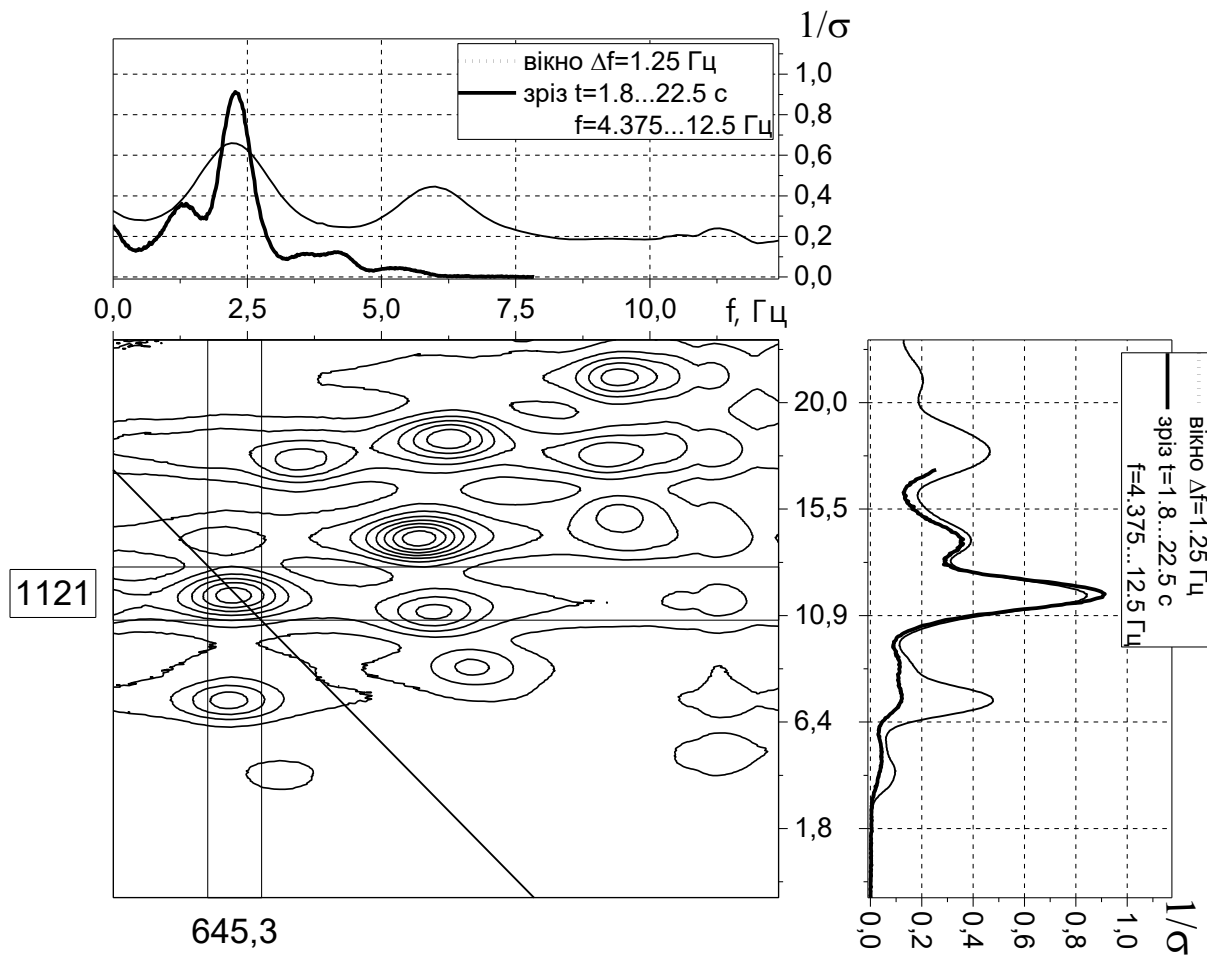


Рисунок 12.5 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

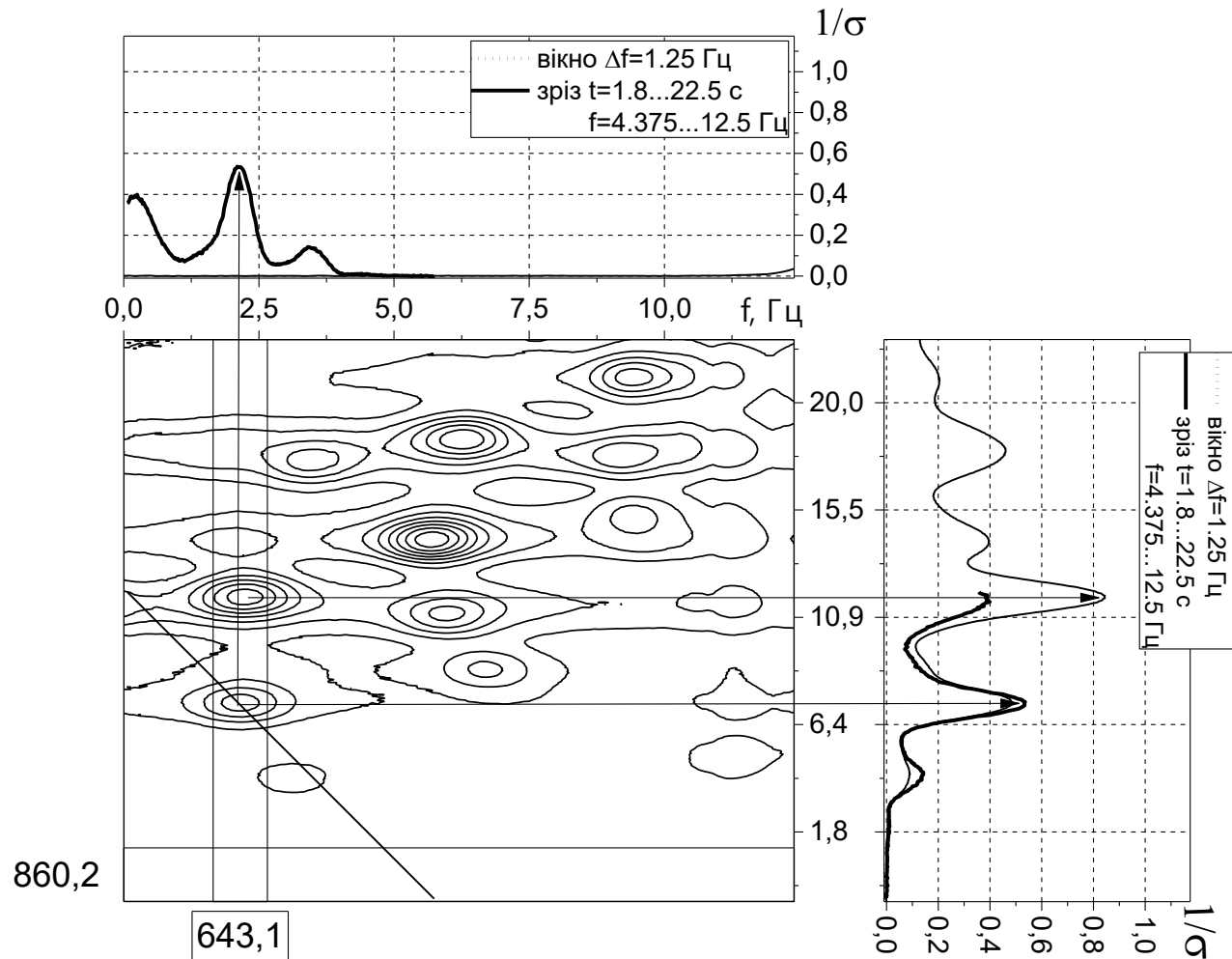
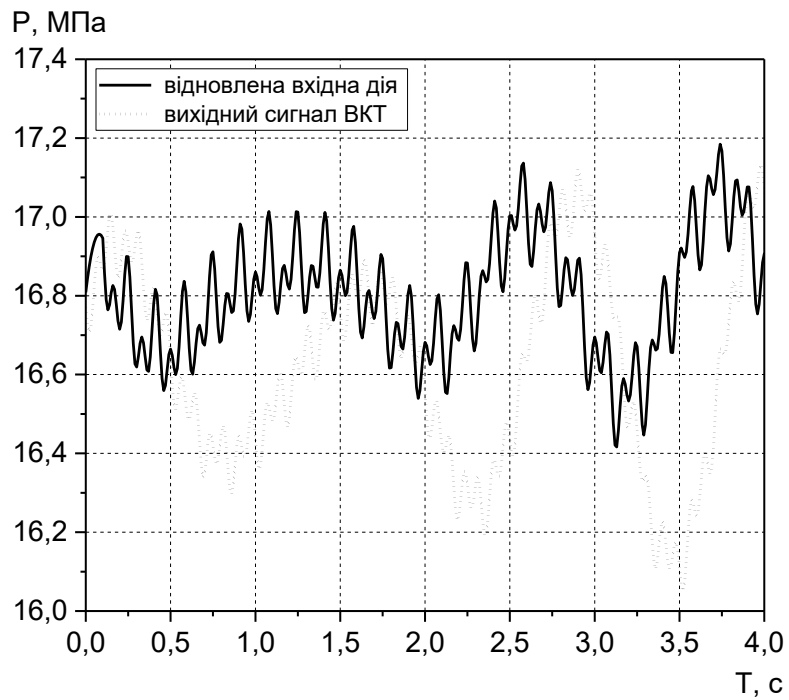


Рисунок 12.6 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

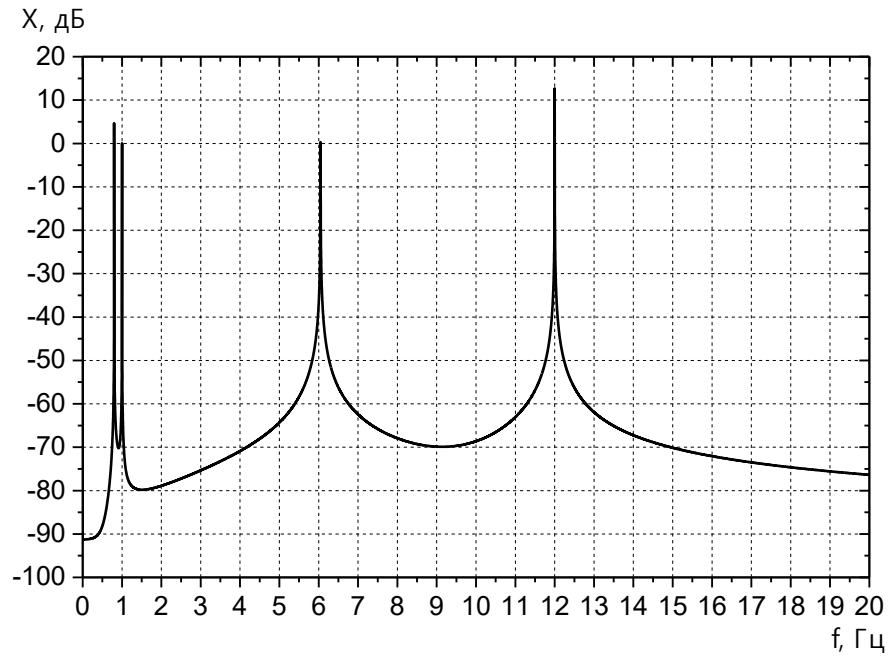


а)



б)

Рисунок 12.7– Відновлена вхідна дія ВКТ методом розв'язання оберненої задачі



вимірювань а) та нейромережним алгоритмом б)

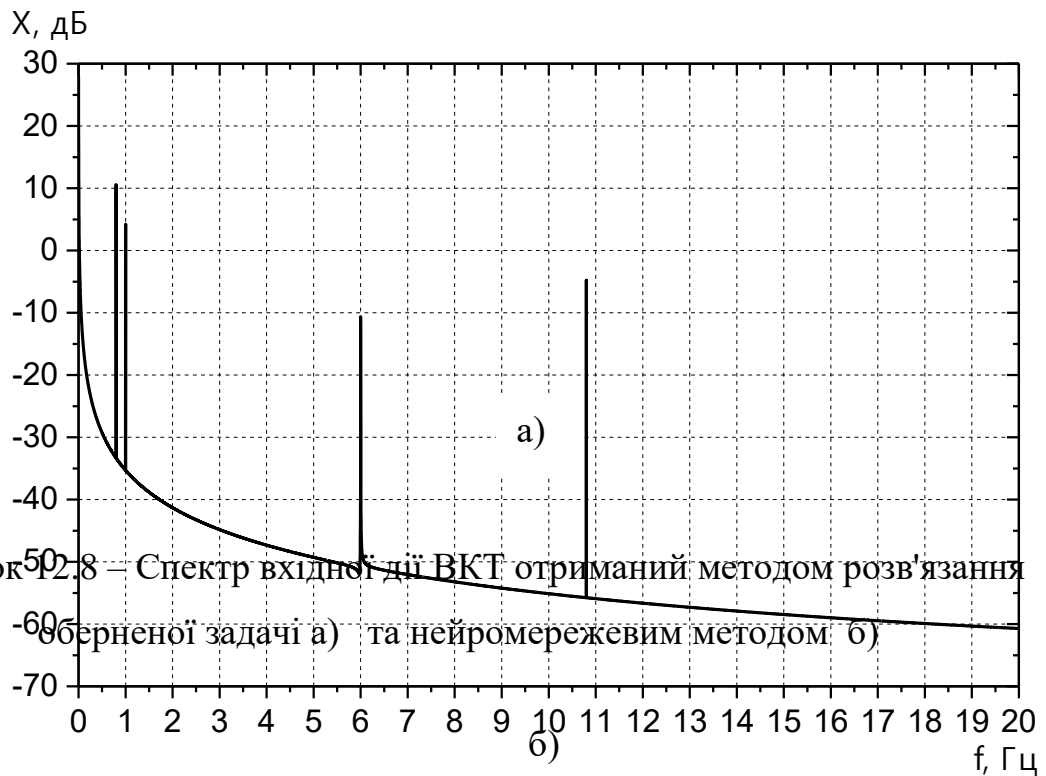
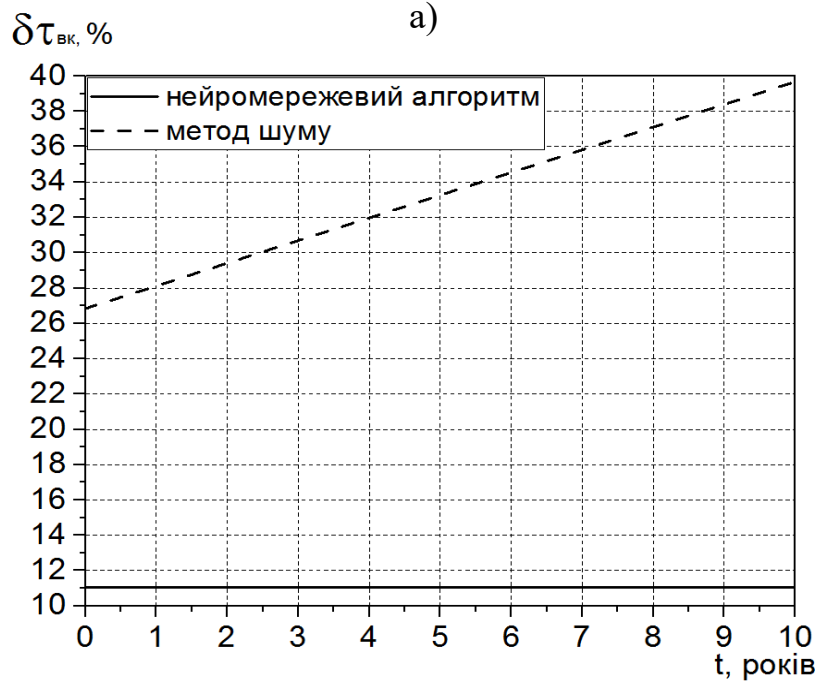
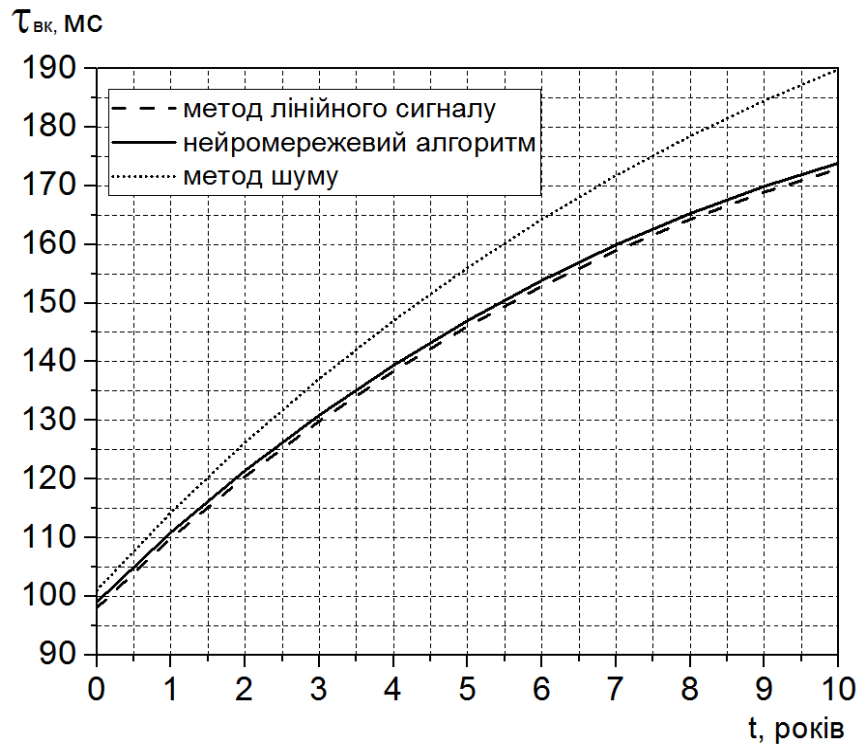


Рисунок 12.8 – Спектр вхідної дії ВКТ отриманий методом розв'язання оберненої задачі а) та нейромережним методом б)



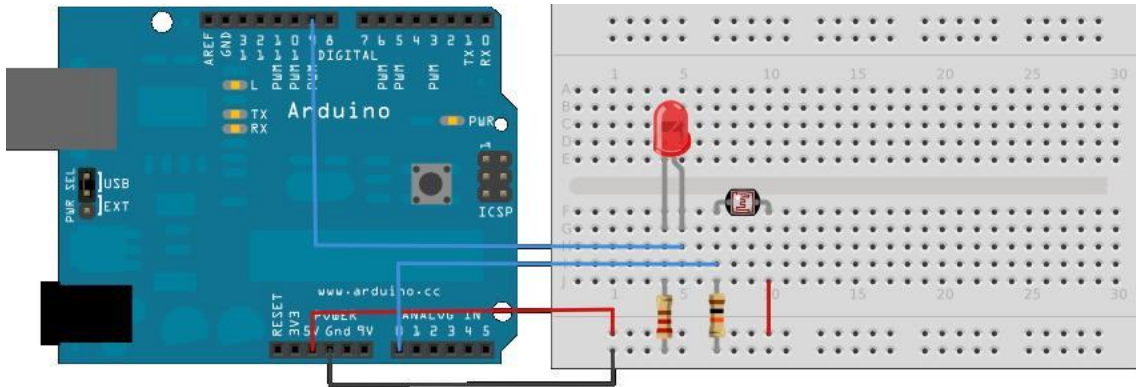
б)

Рисунок 12.9 – Залежність постійної часу вимірювального каналу тиску $\tau_{вк}$ від терміну його експлуатації, що визначена методом лінійного сигналу, методом шуму та нейромережевим методом (а) і залежність відносної похибки визначення постійної часу вимірювального каналу тиску $\delta\tau_{вк}$ від терміну його експлуатації для методу аналізу шумів та нейромережевого методу (б).

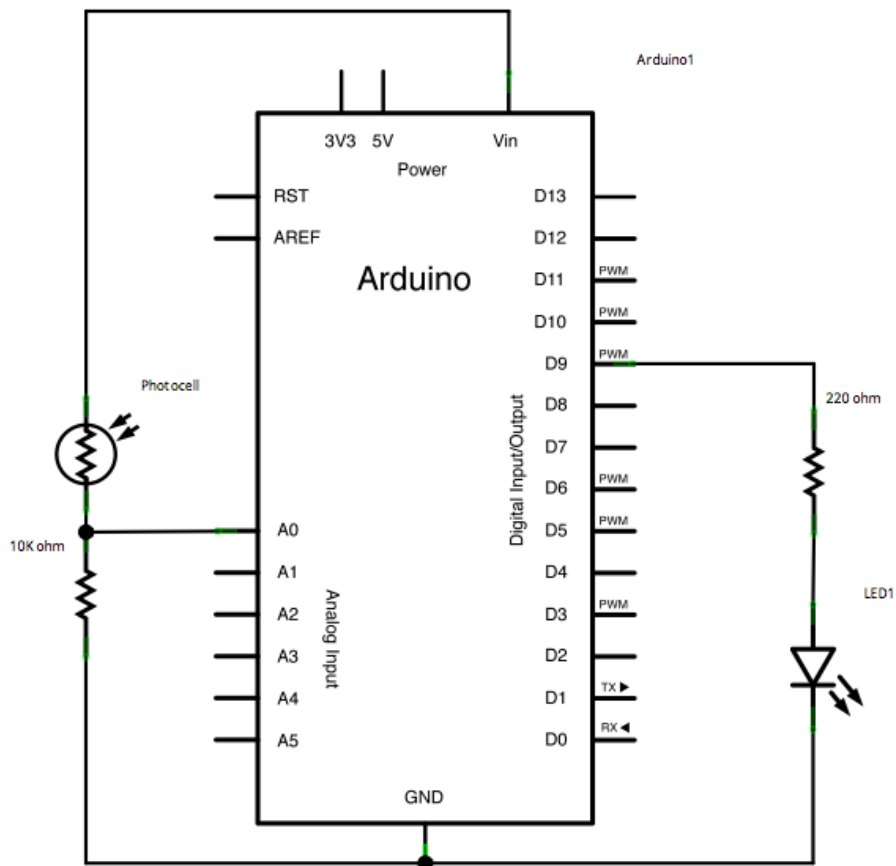
Критерієм ефективності була відносна похибка визначення постійної часу вимірювального каналу (рис. 12.9б). В якості опорної постійної часу прийнята постійна часу ВКТ, що отримана експериментально. Встановлено, що на протязі 10 років експлуатації відносна похибка визначення постійної часу вимірювального каналу тиску $\delta\tau_{вк}$ змінюється: для методу шумів на 13% (з 27% до 40%, дисперсія похибки також змінюється з 5 до 12); для методу з використанням нейронної мережі – $\delta\tau_{вк}$ практично постійна і становить 11%.

КАЛІБРУВАННЯ АНАЛОГОВОГО СЕНСОРА

Аналоговий сенсор (наприклад, потенціометр, сенсор світла) підключається до аналогового входу 2. Світлодіод на цифровий вихід 9.



З'єднаєте світлодіодний цифровий вивід 9 з резистором 220 Ом для обмеження струму. Підключіть фотоелемент до виводу 5, а потім до аналогового виводу 0 разом з підтягуючим на землю резистором в 10 кОм.



До установки, необхідно задати початкові значення мінімального й максимального рівня:

Код:

```
int sensormin = 1023; // мінімальне значення
int sensormax = 0; // максимальне значення
```

Вони можуть здатися зворотними. Спочатку, ви встановлюєте високий рівень і читаєте значення нижче, зберігаючи його як новий мінімум. Крім того, ви встановите максимально низький рівень і будете зчитувати що-небудь вище, новий максимум, от так:

Код:

```
// калібрування протягом 5с
while (millis () < 5000)
{
  sensorvalue = analogread (sensorpin);
  // устанavimo максимальне значення
  if (sensorvalue > sensormax)
  {
    sensormax = sensorvalue;
  }
  // устанavimo мінімальне значення
  if (sensorvalue < sensormin)
  {
    sensormin = sensorvalue;
  }
}
```

Таким чином, будь-які подальші показання можуть бути зіставлені в діапазоні між цим мінімальним і максимальним:

```
//застосуємо калібрування
sensorvalue=map(sensorvalue, sensormin, sensormax, 0, 255);
```

От ціла програма:

```
// Калібрування
// Демонструється одна методика калібрування датчика.
// Схема:
// аналоговий сенсор (потенціометр наприклад):
аналоговий вхід 0
```

```
// світлодіод: цифровий пін 9 до землі

// Ці константи не будуть змінюватись:
const int sensorpin = A0; // вивід до якого підключений
сенсор
const int ledpin = 9; // вивід до якого підключений
світлодіод

// змінні:
int sensorvalue = 0; // значення датчика
int sensormin = 1023; // мінімальне значення датчика
int sensormax = 0; // максимальне значення датчика

void setup ()
{
  // підключаємо світлодіод як індикатор початку роботи:
  pinMode (13, OUTPUT);
  digitalWrite (13, HIGH);

  // калібрування протягом 5 с
  while (millis () < 5000)
  {
    sensorvalue = analogread (sensorpin);
    // установимо максимальне значення
    if (sensorvalue > sensormax)
    {
      sensormax = sensorvalue;
    }
    // установимо мінімальне значення
    if (sensorvalue < sensormin)
    {
      sensormin = sensorvalue;
    }
  }
  // виключимо світлодіод в кінці
  digitalWrite (13, LOW);
}

void loop ()
{
  // зчитуємо інформацію з сенсора:
  sensorvalue = analogread (sensorpin);
  // застосовуємо калібрування
  sensorvalue = map (sensorvalue, sensormin, sensormax, 0,
```

```
255);  
// якщо значення сенсора вийшло за межі калібрування  
sensorvalue = constrain (sensorvalue, 0, 255);  
// включити світлодіод по каліброваному значенню:  
analogwrite (ledpin, sensorvalue);  
}
```