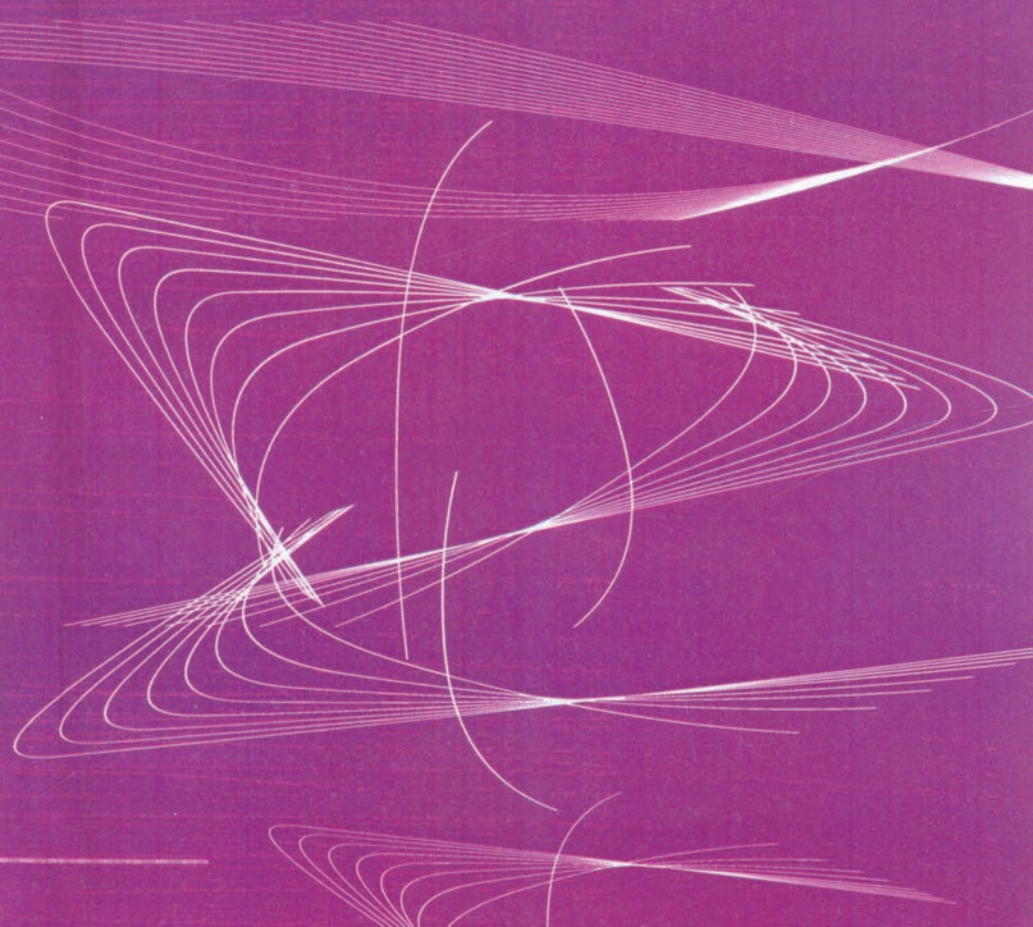


**ФІЛІНЮК М. А., БАГАЦЬКИЙ В. О.,
ЛЩИНСЬКА Л. В., ВОЙЦЕХОВСЬКА О. В.**

**КРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**КРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК [681.5+004.3](075)

ББК [32.965+32.97]я73

К82

Автори:

Філінюк М. А., Багацький В. О., Ліщинська Л. Б., Войцеховська О. В.

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямком підготовки «Радіоелектронні апарати» (лист № 1/11-17618 від 18.11.2013 р.).

Рецензенти:

Яковлев Ю. С., доктор технічних наук, професор

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор

Гамаюн В. П., доктор технічних наук, професор

Критеріальне оцінювання ефективності інформаційних пристроїв К82 та систем : навчальний посібник / [М. А. Філінюк, В. О. Багацький, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська] – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 143 с.

ISBN 978-966-641-556-4

В навчальному посібнику розглянуто питання побудови і застосування критеріїв ефективності і якості інформаційних пристроїв і систем.

Призначений для студентів старших курсів спеціальностей «Радіоелектронні апарати та засоби», «Технології та засоби телекомунікацій», «Електронні прилади та пристрої», «Комп'ютерні системи та мережі», «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика», «Лазерна та оптоелектронна техніка», «Метрологія та вимірювальна техніка», «Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої» денної та заочної форм навчання, які можуть використовувати його при підготовці курсових і дипломних проектів, бакалаврських та магістерських робіт.

УДК [681.5+004.3](075)

ББК [32.965+32.97]я73

ISBN 978-966-641-556-4

© М. Філінюк, В. Багацький, Л. Ліщинська, О. Войцеховська, 2014

ЗМІСТ

СТУП.....	5
ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ПРИСТРОЇВ.....	7
1.1 Визначення та класифікація інформаційних систем.....	7
1.2 Визначення та класифікація інформаційних пристроїв.....	11
1.3 Класифікація параметрів інформаційних систем і пристроїв.....	14
Контрольні запитання та вправи.....	16
АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ПРИСТРОЇВ.....	17
2.1 Визначення понять ефективності та якості інформаційних систем та пристроїв.....	17
2.2 Класифікація критеріїв ефективності.....	19
2.3 Вимоги до критеріїв ефективності.....	21
2.4 Аналіз однопараметричних критеріїв ефективності.....	22
2.5 Аналіз багатопараметричних критеріїв ефективності.....	23
Контрольні запитання та вправи.....	26
КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	27
3.1 Узагальнені вимоги до формування критеріїв ефективності інформаційних систем.....	27
3.2 Часткові критерії оцінювання ефективності інформаційних систем.....	34
3.3 Узагальнений функціонально-статистичний критерій оцінювання ефективності процесу контролю та керування АСКК.....	38
3.4 Критерії оцінювання заводо захищеності інформаційних систем.....	41
Контрольні запитання та вправи.....	44
КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ.....	45
4.1 Узагальнена математична модель ефективності інформаційних пристроїв.....	45
4.1.1 Інформаційний ККД.....	48
4.1.2 Енергетичний ККД.....	52
4.1.3 Економічний ККД.....	53
4.1.4 Динамічний ККД.....	54
4.1.5 Шляхи підвищення ефективності інформаційних пристроїв.....	55
4.2 Оцінювання ефективності перетворювачів інформації.....	56
4.2.1 Основні задачі системного оцінювання ефективності перетворювачів інформації.....	57
4.2.2 Алгоритм синтезу комплексних критеріїв ефективності перетворювачів інформації.....	59
4.3 Критеріальне оцінювання ефективності вимірювальних засобів.....	63
4.4 Критеріальне оцінювання ефективності каналів передавання вимірюваної інформації.....	66

4.5 Критеріальне оцінювання ефективності оптоелектронної елементної бази	69
4.6 Критеріальне оцінювання ефективності НВЧ-фільтрів.....	71
4.7 Критеріальне оцінювання ефективності струмових конвеєрів.....	73
Контрольні запитання та вправи	79
5 КРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	
УЗАГАЛЬНЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМІТАНСУ	
I ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ НА ЇХ ОСНОВІ	80
5.1 Визначення і параметри узагальнених перетворювачів імітансу.....	80
5.2 Критеріальне оцінювання ефективності узагальнених перетворювачів імітансу.....	89
5.2.1 Концепція побудови критерію ефективності УПП.....	89
5.2.2 Коефіцієнти корисної дії УПП за робочими параметрами	90
5.3 Оцінювання ефективності елементів керування на базі транзисторних узагальнених перетворювачів імітансу	94
5.3.1 Аналітичний метод оцінювання ефективності КЕ.....	94
5.3.2 Графоаналітичний метод оцінювання ефективності керуючих елементів	102
Контрольні запитання та вправи	109
6 МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ І ЯКОСТІ	
ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ	110
6.1 Поняття про інформаційні середовища розробки та виробництва промислової продукції.....	110
6.2 Нормативні документи з оцінювання технічного рівня та якості промислових виробів	111
6.3 Системний рівень проектування електронних пристроїв.....	114
6.4 Методика оцінювання інтегральної якості.....	115
6.4.1 Формулювання задачі.....	115
6.4.2 Вибір нормувальної функції	118
6.4.3 Вибір цільової функції	122
6.4.4 Вибір вагових коефіцієнтів	124
6.4.5 Оцінювання якості перетворювачів за різними нормувальними та цільовими функціями.....	125
6.5 Кількісне оцінювання ступеня спеціалізації.....	126
6.6 Перетворювачі загального застосування.....	127
6.7 Оцінювання технічного рівня та якості АЦП з урахуванням розсіяваної потужності.....	129
6.8 Методика оцінювання технічного рівня, якості та ступеня спеціалізації	134
Контрольні запитання та вправи	136
ЛІТЕРАТУРА	137
ГЛОСАРІЙ	141

Присвячується

90-річчю

Кузьміна Івана Васильовича,

доктора технічних наук, професора,
заслуженого діяча науки і техніки України,
який зробив значний внесок в розвиток
теорії ефективності автоматичних систем
контролю і керування

ВСТУП

У різних областях науки і техніки дослідники стикаються з необхідністю порівнювати між собою об'єкти, властивості яких визначаються числовими характеристиками. Формальне вирішення цієї задачі полягає в тому, що вводиться деякий критерій якості або ефективності, тобто деякий математичний вираз, що дозволяє протиставити числовим характеристикам, що описують об'єкт, деяке число, яке визначає якість цього об'єкта. Вибір критерію знаходиться в компетенції дослідника, який, опираючись на свої знання про об'єкт дослідження і області його застосування, конструє цей критерій. При виборі критерію разом з об'єктивним елементом (критерій завжди будується з урахуванням аналізу реального об'єкта і аналізу поставленого перед ним завдання) завжди є частка суб'єктивності, оскільки критерій вибирає людина.

Вибір критерію для системи завжди пов'язаний з деяким (великим або малим) ризиком для розробника. При цьому необхідно всебічно зважувати призначення системи, її взаємозв'язок з іншими частинами, якщо система не автономна, наслідки того або іншого вибору критерію.

Поки оцінюванню якості підлягали окремі технічні засоби, елемент суб'єктивізму був хоч і небажаний, але допустимий. Проте, враховуючи, що останнім часом коло об'єктів, що підлягають оцінюванню, значно розширилося, актуальність підвищення об'єктивності методів також істотно росла. Саме цим пояснюється виникнення нового напрямку – кваліметрії – наукової області, що вивчає і розробляє принципи і методи кількісного оцінювання якості.

При синтезі (проекуванні) інформаційної системи і пристрою характерними є такі завдання.

1. Синтез структури системи (пристрою).
2. Вибір оптимального варіанта побудови системи або пристрою зі скінченної кількості заданих (знайдених) елементів.
3. Вибір оптимальних значень параметрів системи (пристрою).

Кожне з цих завдань зазвичай вирішується поєднанням математичних і

евристичних методів шляхом використання критеріїв ефективності системи (пристрою). Під технічною ефективністю в більшості випадків розуміється ступінь пристосованості засобів інформаційної техніки до виконання поставлених завдань (функції). Вибір конкретних критеріїв ефективності залежить від призначення системи і вимог, що висуваються до неї.

У технічній літературі є велика кількість публікацій, присвячених розробці та застосуванню часткових показників ефективності і якості. Проте кількість публікацій, що узагальнюють результати досліджень в цій області, обмежена або присвячена якомусь одному виду інформаційного пристрою або системи. Це перш за все монографії авторів Кузьміна І. В. [1], Цапенка М. П. [2], Гуткіна Л. С. [3], Моїсеєва В. С. [4], Касаткіна А. С. [5], Новицького П. В. [6], Юрлова Ф. Ф. [7], результати досліджень яких частково узагальнені в даному навчальному посібнику. Основний зміст базується на результатах авторів, отриманих при проведенні наукових досліджень.

Метою навчального посібника є дати користувачеві систематичні уявлення про принципи побудови і застосування критеріїв ефективності, визначення якості інформаційних систем і пристроїв.

Виходячи з цього, в першому розділі даються визначення і класифікація інформаційних систем та пристроїв, а також їх параметрів. У другому розділі визначається поняття ефективності і якості. Наводиться класифікація критеріїв ефективності, обґрунтовуються вимоги до критеріїв ефективності, проводиться аналіз відомих однопараметричних та багатопараметричних критеріїв ефективності.

Третій і четвертий розділи присвячені опису і застосуванню узагальнених критеріїв ефективності інформаційних систем і пристроїв. У п'ятому розділі проводиться критеріальне оцінювання ефективності узагальнених перетворювачів імітансу і інформаційних пристроїв на їх основі. Методиці оцінювання технічного рівня і якості інформаційних пристроїв присвячений шостий розділ.

Ряд питань розглядається з досить загальних позицій, що дозволяє застосовувати отримані результати при проектуванні різних видів інформаційних пристроїв і систем.

Навчальний посібник розрахований на студентів старших курсів спеціальностей 7(8).05090201 – «Радіоелектронні апарати та засоби», 7(8).05090303 – «Технології та засоби телекомунікацій», 7(8).05080201 – «Електронні прилади та пристрої», 7(8).05010201 – «Комп'ютерні системи та мережі», 7(8).05020101 – «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика», 7(8).05100402 – «Лазерна та оптоелектронна техніка», 7(8).05100101 – «Метрологія та вимірювальна техніка», 7(8).05080101 – «Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої» денної та заочної форм навчання, які можуть використовувати його при підготовці курсових і дипломних проєктів, бакалаврських і магістерських робіт.

1 ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ПРИСТРОЇВ

1.1 Визначення та класифікація інформаційних систем

Відповідно до стандарту ISO/IEC 2382-1 інформаційна система – це система обробки інформації, яка працює разом з організаційними ресурсами, такими як люди, технічні засоби та фінансові ресурси, що забезпечують та розподіляють інформацію.

В інформаційні системи включаються засоби, призначені для отримання, перетворення, передачі, накопичення, відображення та зберігання інформації, одержуваної від людини, природи, машини, взагалі від будь-якого об'єкта спостереження і керування.

Інформаційні системи відрізняються від інших природних або штучних (технічних) систем тим, що в них присутні органи та зв'язки спостереження або керування, процеси обігу інформації, сигнальні форми відображення речових або енергетичних явищ. Інформаційні системи завжди можуть бути подані або технікою, або людьми. Наприклад, інформаційна система старовинного корабля складається з людей (дозорні, сигнальники, боцмани, лоцмани), а сучасного корабля – з автоматичних пристроїв передачі, обробки даних і керування.

Характерною особливістю сучасних інформаційних систем є високий ступінь автоматизації. Все різноманіття інформаційних систем можна поділити на такі основні класи [8]:

Централізовані інформаційні системи (ЦІС), призначені для контролю і керування складними інформаційними процесами. До централізованих інформаційних систем відносяться:

- ЦІС для контролю безперервних технологічних процесів;
- ЦІС для контролю дискретних технологічних процесів і продукції;
- ЦІС для контролю виробництва масової продукції.

Автоматичні випробувальні системи (АВС), призначені для автоматизації складних інформаційних процесів. Автоматичні випробувальні системи поділяються на:

- АВС для випробування простих виробів та обладнання;
- АВС для випробування радіоелектронного обладнання;
- АВС для випробування електротехнічного обладнання, машин і механізмів.

Складні автоматизовані інформаційні системи, призначені для здійснення централізованого контролю і керування складними об'єктами, що включають автоматичні й автоматизовані системи керування (АСК). Ці системи поділяються:

- за галузями застосування;
- за складністю;

– за ступенем автоматизації.

Всі інформаційні системи, крім контролю, більшою або меншою мірою здійснюють керування або ведуть контроль для потреб керування.

До інформаційних систем також відносяться інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) [2] і системи автоматичного регулювання та керування.

В наш час ІВС поділяються за функціональним призначенням на вимірювальні, контрольні, діагностичні та інші системи [2]. Класифікація систем за принципом їх побудови виконується відносно систем часткового виду. Так, наприклад, розглядаються сканувальні системи, системи з багатократним і однократним використанням каналів контролю, системи з комутаторами і под.

Основна умова ефективності будь-якої класифікації – це раціональний вибір ознак, які дозволили б достатньо просто описати всю систему класів і віднести об'єкт, що розглядається, до певного класу. При виборі класифікаційних ознак ІВС доцільно відволіктися від численних особливостей, що визначаються вузьким призначенням систем і їх технологічно-конструктивним виконанням. Кількість класифікаційних ознак повинна бути обмеженою, але достатньою для характеристики основних видів ІВС.

При класифікації ІВС враховується:

- вид вхідних (досліджуваних) величин;
- вид вихідної інформації;
- принципи побудови систем.

Ця класифікація побудована за принципом розділення області, яка характеризується ознакою, на дві непересічні підобласті. Основні варіанти «бінарного» вигляду при класифікації реальних систем можуть доповнюватися їх комбінаціями. Так, наприклад, реально існують ІВС не тільки з послідовним або паралельним, але й з паралельно-послідовним виконанням операцій отримання інформації.

Незважаючи на важливість знання характеристик ІВС вибір їх як класифікаційних ознак пов'язаний з істотними труднощами, оскільки всі спільні характеристики (похибка, швидкодія, надійність та ін.) є кількісними. В межах діапазону значень тієї чи іншої характеристики можна виділити ряд інтервалів. Однак зіставлення ІВС за їх місцем в такій системі ознак (особливо за бінарним принципом) у загальному випадку умовне. Справді, похибка 0,5 % при лабораторних умовах роботи системи може вважатися відносно великою порівняно з тією ж похибкою у системи, що працює у важких експлуатаційних умовах. Тому зіставлення ІВС за кількісними характеристиками ефективно тільки для ІВС з однаковим, порівняно вузьким функціональним призначенням.

При класифікації різних ІВС використовуються терміни вимірювана або контрольована величина.

У табл. 1.1 наведено класифікацію вхідних величин ІВС, запропоновану в [2]. Кількість досліджуваних величин i визначається сумою всіх (у то-

му числі однорідних) величин. При $i \geq 2$ вхідні величини можуть бути незалежними і взаємопов'язаними. Досліджувані величини можуть змінюватися з часом і бути розподіленими в просторі за різними законами, можуть мати неперервний або дискретний характер.

Під активними розуміються величини, здатні здійснювати енергетичні впливи на вхідні пристрої системи без залучення додаткових джерел енергії. До них, наприклад, відносяться електричний струм і напруга, іонізуючі, світлові, теплові випромінювання, механічні сили, тиски і т. п. До пасивних – опори електричних кіл, механічні опори, твердість, жорсткість і т. п.

Таблиця 1.1 – Класифікація вхідних величин ІВС

Номер п/п	Класифікаційна ознака	Підкласи	
1	Кількість величин i	$i = 1$	$i \geq 2$
2	Поведінка в часі t	Незмінна	Змінна
3	Розташування в просторі s	Зосереджене	в Розподілене в просторі
4	Характер величин	точці	Дискретні
5	Енергетична ознака	Неперервні	Пасивні
6	Суміш завод з досліджуваними величинами	Активні	Заводи, пов'язані з досліджуваними величинами
		Незалежні заводи	

Зовнішні відносно ІВС заводи часто невіддільні від досліджуваних величин, оскільки фізично викликаються тими ж явищами. Розмежування їх з величинами, що вивчаються, у багатьох випадках пов'язане зі значними труднощами. Заводи можуть характеризуватися тими ж ознаками, що і вимірювані величини. Тому їх розділяють на незалежні від вхідних величин і з ними пов'язані.

Розглянуті класифікаційні ознаки дозволяють підійти до орієнтовного розподілу областей використання різного ступеня складності технічних засобів інформаційної вимірювальної техніки.

Основні різновиди вхідних величин X_i характеризуються їх кількістю і та кількістю аргументів (t – час, s – просторова координата).

Подальша деталізація області використання ІВС залежно від вигляду вихідної інформації та інших класифікаційних ознак наведена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація видів вихідної інформації ІВС

Номер п/п	Класифікаційна ознака	Підкласи	
1	Характер вихідної інформації	Вимірювана інформація – іменовані числа, їх співвідношення, графіки і т. п.	Кількісні судження – контрольна і діагностична інформація
2	Ступінь обробки вихідної інформації	Результати оцінювання одного параметра	Показники – функціональні, статистичні та ін.
3	Споживач інформації	Людина-оператор	АСК

Відповідно до табл. 1.2 ІВС можна поділити на вимірювальні, контрольні, діагностичні системи та системи розпізнавання образів. На практиці велике поширення мають також змішані системи, наприклад контрольно-вимірювальні.

Спостерігається зв'язок між характером вихідної інформації та параметрами досліджуваних величин, з одного боку, і внутрішньою структурою ІВС – з іншого. Так, наприклад, при кількості досліджуваних взаємопов'язаних величин $i \geq 2$ для отримання результатів оцінювання кожної величини необхідно організувати процедури їх окремого оцінювання. При незалежних величинах, кількість яких невелика ($i \leq 20$), реєстрація їх проводиться багатоканальними приладами. Якщо кількість вимірюваних величин велика і дані про кожну з них потрібно подати в цифровому вигляді, то ці функції виконуються ІВС. Класифікаційна ознака – «споживач інформації» – характеризує автономність ІВС. Автономність припускає видачу вихідної інформації безпосередньо від ІВС людині-оператору. Неавтономні ІВС є частинами відповідних систем – АСК, та ін.

У системах автоматичного контролю та технічної діагностики виконуються специфічні задачі, які вирішуються спільно засобами вимірювальної та обчислювальної техніки.

Залежно від рівня автоматизації системи обробки інформації можна поділити на:

1. Неавтоматизовані (ручні) системи – системи, в яких машинній (механізованій) обробці піддаються тільки прості, але найбільш трудомісткі з точки зору людської праці операції. Ці системи слугують для того, щоб подолати вузькі місця, з якими не можна впоратися при ручній роботі, а також усунути певні типи помилок, пов'язаних з ручною працею. При цьому в основному використовуються найпростіші пристрої для виконання нескладних обчислювальних робіт.

2. Механізовані системи – системи, в яких для машинної обробки використовуються цілі підсистеми, проте зв'язок між цими підсистемами здійснюється через людину. Системи обробки цього типу можна віднести до класу систем «людина-машина», де людина є однією з ланок системи.

3. Автоматизовані системи – системи обробки, в яких діяльність людини обмежена збором даних, оцінюванням результатів та прийняттям рішень на їх основі. Всі інші операції виконуються автоматично з використанням складних електронних пристроїв перетворення, передачі і подання інформації, безпосереднього введення-виведення її в ЕОМ і т. п.

4. Автоматичні системи – системи власне автоматичної обробки, де технічним пристроям передаються функції збору інформації, розпізнавання ситуацій і генерації рішень, і людина майже повністю виключена зі сфери обробки. Її функції зводяться до підготовки системи для обробки даних та прийняття в процесі обробки рішень в ситуаціях, які не були запрограмовані для системи заздалегідь. Автоматичні системи застосовуються для ке-

рування виробничими і технологічними процесами. В системах збору й обробки інформації при проведенні наукових експериментальних досліджень проблема прийняття рішення залишається сферою діяльності людини.

1.2 Визначення та класифікація інформаційних пристроїв

Як б не була складна інформаційна система, вона складається з окремих найпростіших інформаційних пристроїв (ІІ), призначених для здійснення інформаційних процесів малої складності [8]. До найпростіших інформаційних пристроїв відносять: сигналізатори та індикаторні пристрої; зчитувальні та реєструвальні пристрої, в тому числі пристрої зчитування магнітних і перфораційних записів; датчики; пристрої для автоматичної обробки діаграм; обчислювальні пристрої; лінеаризатори, логічні елементи, інтегратори, усереднювачі і пристрої статичної обробки випадкових величин і процесів та ін.

Інформаційні пристрої, алгоритм функціонування яких не залежить від алгоритму функціонування інформаційної системи, призначені для перетворення повідомлень в сигнал і навпаки, а також для зміни фізичної природи або параметрів сигналу, називаються інформаційними пристроями перетворення (ІІІ). Прикладами таких пристроїв є: пристрої кодування та декодування, аналого-цифрові перетворювачі, цифро-аналогові перетворювачі, вимірювальні перетворювачі, акустично-електричні та електронно-оптичні перетворювачі, перетворювачі імітансу, логічні пристрої і т. п.

Інформаційні пристрої, алгоритм функціонування яких змінюється з часом за законом, який визначається алгоритмом функціонування інформаційної системи (тобто відбувається керування алгоритмом функціонування), називаються інформаційними пристроями керування (ІІК). Прикладами таких пристроїв є: комутатори, керовані атенюатори, фазообертачі, керовані фільтри і т. п.

Враховуючи, що в більшості інформаційних систем основним носієм інформації є електричний сигнал, в подальшому розглядаються ІІ перетворення та керування електричними сигналами. Узагальнену функціональну схему цих пристроїв подано на рис. 1.1.

Пристрої мають три основні види сигналів: вхідний сигнал, вихідний сигнал та сигнал керування. Залежно від виду ІІ кола для вхідних та вихідних сигналів можуть бути різними (пристрої прохідного типу), або вони можуть бути об'єднані (пристрої відбивного типу), як показано на рис. 1.1. В ІІІ відсутні сигнали керування, але може бути опорний сигнал. Крім інформаційних сигналів в ІІ поступає сигнал перешкоди. Він може потрапити як по колах основного сигналу та сигналу керування, так і по колах живлення або породжується в самому інформаційному пристрої.

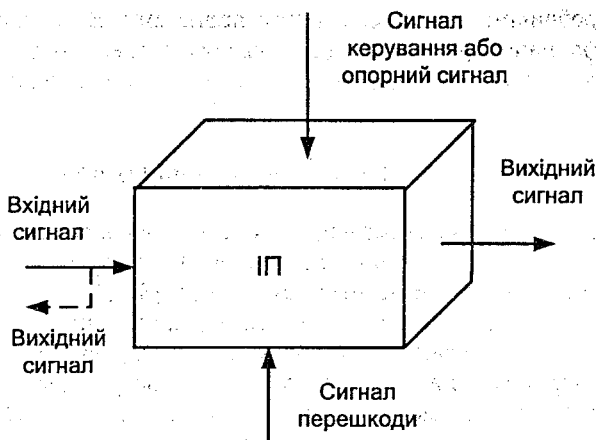


Рисунок 1.1 – Узагальнена функціональна схема інформаційного пристрою

Розглянемо ознаки, за якими також можна класифікувати ІП.

Першою класифікаційною ознакою є вид вхідного сигналу. На вході ІП може бути велика кількість однорідних або різнорідних за фізичною природою сигналів (електричних, механічних, теплових та ін.) і супутніх їм завад, що мають різні характеристики.

Другою класифікаційною ознакою є принцип побудови ІП. Він залежить від його призначення, умов експлуатації та інших вимог. При цьому ІП будуються на базі різноманітних фізичних ефектів, що забезпечують їх найбільшу ефективність.

Третя класифікаційна ознака характеризує функціональне призначення ІП. При цьому вид вихідної інформації багато в чому визначає функціональне призначення ІП.

Залежно від видів електричних сигналів, всі ІП поділяються на ІП, що використовують відеоімпульсні сигнали, та на ІП, що використовують гармонічні сигнали (рис. 1.2). Інформаційні пристрої другого виду поділяються на аналогові та радіоімпульсні.

Основним елементом більшості типів ІП є активний компонент. Як активні компоненти сучасні ІП використовуються напівпровідникові прилади, які утворені різними напівпровідниковими структурами. Вони відрізняються в залежності від використовованого матеріалу, діапазону робочих частот, потужності розсіювання, призначення. Крім того, всі напівпровідникові структури можна поділити на напівпровідникові структури, що мають негативні опори (НО) і не мають НО.

Напівпровідникові структури з НО, які одержали назву негatronи, поділяються на дві групи: на двоелектродні, які використовуються в діодах, та на багатоелектродні, які переважно використовуються в транзисторах, тиристорах, польових тетрадах, двобазових діодах (ДД) та приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). В свою чергу напівпровідникові структури цих груп можна поділити на ті, в яких НО спостерігається на спадній ділянці статичної вольт-амперної характеристики – статичні НО (СНО) (наприклад, напівпровідникові структури, що використовуються в тунельних діодах (ТД), обернених діодах (ОД), лавинних транзисторах (ЛТ)) та на напівпровідникові структури, в яких цей опір спостерігається тільки в динамічному режимі – динамічні НО (ДНО) (наприклад: напівпровідникові структури, що використовуються в лавинно-пролітних діодах (ЛПД), інжекційно-пролітних діодах (ІПД), інжекційно-пролітних транзисторах (ІПТ), інжекційно-лавинно-пролітних транзисторах (ІЛПТ), польових транзисторах (ПТ), діодах Ганна (ДГ), надпровідних лініях (НЛ)).

Перевагою останньої групи структур, а тому і ПІ на їх основі, є вища надійність та стабільність, пов'язані з наявністю ДНО в обмеженому діапазоні частот, що виключає загрозу їх самозбудження за робочим діапазоном і дозволяє відмовитися від застосування спеціальних кіл стабілізації, а отже, покращити масогабаритні характеристики та спростити проектування.

В загальному випадку всі напівпровідникові структури з НО є елементами з розподіленими параметрами. Але в залежності від співвідношення між довжиною електромагнітної хвилі λ_e та її геометричними розмірами, вони поділяються на структури з розподіленими та із зосередженими параметрами. Коли довжина хвилі λ_e співрозмірна з геометричними розмірами напівпровідникового кристалу – їх розглядають як структури з розділеними параметрами. Під напівпровідниковими структурами із зосередженими параметрами розуміють такі, геометричні розміри яких значно менші довжини хвилі λ_e електромагнітних коливань в них.

1.3 Класифікація параметрів інформаційних систем і пристроїв

Будь-які інформаційні системи (ІС) та інформаційні пристрої і умови їх функціонування характеризуються певною сукупністю параметрів. На різних етапах аналізу, синтезу, виробництва й експлуатації необхідні різні засоби їх опису і, відповідно, використовуються різні групи параметрів, що називаються параметричними базисами. Їх можна класифікувати за такими основними ознаками [4].

1. Відношення до даних ІС або ПІ, що може бути безпосереднім або непрямим. Безпосередні параметри безпосередньо характеризують дані ІС та ПІ. Непрямі параметри характеризують умови, в яких вони функціонують.

2. Характер відображуваних функціональних і вартісних властивостей. До функціональних параметрів відносять усі параметри, що характе-

ризують інформаційні системи та пристрої, з погляду на їх функціональні можливості (точність, надійність, швидкодія та ін.). Вартісні параметри характеризують усі витрати на забезпечення функціональних можливостей.

3. **За ступенем важливості параметрів.** Ці параметри поділяються на домінуючі і не домінуючі, другорядні для заданих умов експлуатації.

4. **За ступенем комплексності відображення якості.** Ці параметри можна розділити на внутрішні, зовнішні та узагальнені. Внутрішні параметри характеризують ІС та ІП з точки зору розробника і підлягають визначенню в процесі розробки. Зовнішні параметри описують ІС та ІП із точки зору споживача. Узагальнені параметри є показниками якості у даних системних умовах. Вони пов'язують у необхідних пропорціях домінуючі зовнішні параметри і в кінці-кінців, залежать від внутрішніх і непрямих параметрів.

5. **За наявністю (або відсутністю) зв'язку між числовими значеннями параметрів і якістю ІС та ІП.** Числові значення внутрішніх або узагальнених параметрів відображають певні властивості ІС та ІП або сукупність їх властивостей і тому вони відносяться до кількісних параметрів. Якісними є також параметри, за якими неможливо «ранжирувати» ІС та ІП у порядку зростання або спадання певних властивостей.

6. **За характером взаємозв'язку (якщо такий існує) числових значень параметрів із якістю ІС та ІП.** Параметр є підвищувальним, якщо його більшому значенню відповідає більш висока якість пристрою, і знижувальним – у протилежному випадку.

7. **За властивістю параметрів, коли вони поділяються на скалярні і векторні.** Параметр називається векторним, якщо його можна подати у вигляді сукупності компонентів, кожен із яких у свою чергу є параметром групи одного виду: внутрішнім, зовнішнім, узагальненим. Параметри, які не можна розкласти на складові компоненти, відносять до скалярних.

Для порівняння різних систем обробки інформації розглядаються основні характеристики цих систем з точки зору виконання технологічних операцій і вимог до вхідної та вихідної інформації. Такими характеристиками систем обробки є:

1. Пропускна здатність, що визначається швидкістю виконання обчислювальних робіт і робіт з введення та виведення інформації (біт за секунду, масивів за добу та ін.);

2. Продуктивність, яка залежить від трудомісткості роботи із алгоритмізації та програмування задач та від пропускнув здатності системи (кількість задач за добу, обчислювальних операцій за секунду та ін.);

3. Точність, що визначається величиною та кількістю помилок, які виникають при обробці інформації;

4. Надійність, можливість контролю і самоперевірки;

5. Рівень автоматизації операцій в системі.

6. Принцип організації інформаційних потоків і масивів, який визначається об'ємом даних, які одночасно вводяться в систему, формами та мовами подання інформації, зручністю поділу вхідних масивів на підмасиви,

складністю вихідної інформації для сприйняття, паралельністю або послідовністю операцій, можливістю безпосереднього керування потоками та ін.

7. Економічність, що визначається затратами на придбання та експлуатацію автоматизованого обладнання та їх математичного забезпечення.

8. Часовий режим роботи системи, регулярність, безперервність або періодичність видачі інформації.

9. Гнучкість, тобто здатність системи переналаштовуватись на вирішення нових задач, її пристосовуваність до перерозподілу задач, до розподілу обчислювальних робіт.

Контрольні запитання та вправи

1. Що об'єднує і що відрізняє між собою інформаційні системи та інформаційні пристрої?
2. Яке призначення централізованих інформаційних систем?
3. Яке призначення автоматизованих інформаційних систем?
4. За якими класифікаційними ознаками поділяються ІВС?
5. Наведіть класифікацію видів вихідної інформації ІВС.
6. На які рівні поділяються системи обробки інформації?
7. Наведіть визначення інформаційного пристрою та приклади найпростіших інформаційних пристроїв.
8. За якими ознаками класифікують інформаційні пристрої?
9. Вкажіть основні інформаційні базиси, за якими класифікуються параметри інформаційних пристроїв та систем.
10. Чим відрізняються скалярні та векторні параметри інформаційних пристроїв та систем?

2 АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ПРИСТРОЇВ

2.1 Визначення понять ефективності та якості інформаційних систем та пристроїв

Поняття ефективності нерозривно пов'язане з поняттям якості інформаційних систем та пристроїв. Якість інформаційної системи (пристрою) – це сукупність властивостей системи, що обумовлюють можливість її використання для задоволення визначених потреб користувачів відповідно до її призначення. Основними показниками якості інформаційних систем і пристроїв є надійність, достовірність, безпека.

Надійність – властивість системи зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих умовах застосування. Надійність інформаційних систем (пристроїв) є засобом забезпечення актуальної і достовірної інформації на виході системи (пристрою).

Достовірність функціонування – властивість системи (пристрою), що обумовлює безпомилковість виконуваних нею перетворень інформації. Достовірність функціонування інформаційної системи (пристрою) повністю визначається і вимірюється достовірністю її результатної інформації.

Безпека інформаційної системи (пристрою) – властивість, що полягає в здатності системи (пристрою) забезпечити конфіденційність і цілісність інформації, тобто захист інформації від несанкціонованого доступу.

Ефективність – це властивість системи (пристрою) виконувати поставлену мету в заданих умовах використання і з певною якістю. Показники ефективності залежать від локальних показників, якими є надійність, достовірність, безпека. Узагальнюючими є показники економічної ефективності системи, що характеризують доцільність затрат на створення і функціонування системи. Ефективність системи (пристрою) є складною, інтегральною властивістю, що залежить від ряду протиставлених властивостей, таких як:

- дієвість системи, тобто ступінь реалізації системою свого призначення (прагматична ефективність);
- технічна досконалість системи (технічна ефективність);
- простота і технологічність розробки і створення системи (технологічна ефективність);
- зручність використання і обслуговування системи (експлуатаційна ефективність) та ін.

Показники ефективності повинні відображати кількісну оцінку ступеня досягнення системою (пристроєм) поставленої мети.

Як показники прагматичної ефективності можуть виступати:

- показники достовірності перетворення інформації;
- показники безпеки інформаційної системи;

- показники точності обчислень і перетворення інформації;
- показники повноти формування системою результатної інформації;
- показники оперативності.

Показники технічної ефективності повинні оцінювати технічну досконалість інформаційної системи (пристрою), оцінювати науково-технічний рівень організації та функціонування цієї системи (пристрою).

Показники технічно-експлуатаційної ефективності дуже різноманітні. Як такі показники можуть виступати показники надійності, функціональні можливості, кількість обслуговуваних абонентів, продуктивність, пропускна здатність, тактова частота, тимчасові затримки, ємність пам'яті, експлуатаційні характеристики, технології обслуговування і т. п.

Узагальнюючими показниками ефективності інформаційної системи (пристрою) є показники економічної ефективності, що характеризують доцільність затрат на створення і функціонування системи (пристрою). Розрахунок витрат зазвичай не складний, а от розрахунок результатів залишається складною, до кінця не вирішеною проблемою. Часто прибуток визначається шляхом експертного оцінювання за аналогією з іншими подібними системами, а соціальний ефект кількісно взагалі не визначається.

Економічна ефективність характеризує відношення результатів – величини прибутку до величини сумарних витрат на створення та експлуатацію системи (пристрою). Як показники економічної ефективності зазвичай використовуються:

– річний економічний ефект $C = C_p - C_n \cdot K_c$;

– коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень $C_e = C_p / K_c$;

– строк окупності капітальних вкладень $T_c = K_c / C_p$,

де K_c – одноразові (капітальні) витрати (вкладення) на створення ІС;

C_p – річна економія (прибуток), одержувана при використанні ІС;

C_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Коефіцієнт C_n характеризує середній рівень ефективності капітальних вкладень. Він повинен бути не менший відсоткової ставки банківського кредиту.

Аналітично технічну ефективність ІС та ІІ прийнято оцінювати критеріями ефективності. Критерій (грец. criterion) – признак, на базі якого формується оцінювання якості об'єкта процесу, мірило такого оцінювання. Наприклад, критерій ефективності характеризує рівень ефективності системи, а критерій оптимальності – наскільки система близька до оптимального стану.

2.2 Класифікація критеріїв ефективності

При розробці інформаційної системи тип ІІІ зазвичай вибирається, виходячи з критерію його роботоздатності, який має одну з можливих форм запису: $b_i \geq b_r$, $b_i \leq b_r$, $b_i = b_r \pm \Delta b_r$, $i=1, 2, \dots, n$, де $b_r, \Delta b_r$ – потрібне значення та допустимий розкид b_i параметра ІІІ відносно параметра b_r [9, 10]. При цьому нерідко виникає ситуація, коли критерію роботоздатності відповідає більше ніж один тип ІІІ. В такому випадку він вибирається практично інтуїтивно, з урахуванням досвіду розробника. Аналогічна ситуація спостерігається при проектуванні ІІІ на базі нового фізичного явища, коли потрібно виконати кількісне оцінювання ефективності однотипних ІІІ, які характеризуються сукупністю параметрів b_i . Найгостріше ця задача стоїть при створенні складних інформаційних систем, оскільки похибка на початкових стадіях може так збільшити вартість системи, що її впровадження стане недоцільним. З метою виключення такого ризику використовуються різні критеріальні оцінки ефективності складних інформаційних систем.

Побудова критерію ефективності ІІІ є одним із найважливіших і найвідповідальніших етапів проектування. По суті на цьому етапі будується "шкала цінностей", за якою повинні порівнюватися різні варіанти ІІІ. Критерій ефективності не можна одержати тільки засобами математики. Розв'язання цієї задачі є евристичною процедурою, що виконується з урахуванням призначення й умов функціонування ІІІ.

В теорії інформаційних пристроїв і систем використовуються різні їх характеристики: точність, швидкість, надійність, вартість і ін. Кожну з них можна розглядати як однопараметричний (частковий) критерій ефективності. Однопараметричні критерії не дають достатньо повного уявлення про його ефективність у цілому. Спроба вибору кращого варіанта ІІІ одночасно за декількома частковими критеріями зазвичай позбавлена змісту, тому що практично поліпшення одного параметра супроводжується погіршенням, принаймні, одного іншого параметра. Все це вказує на необхідність використання узагальнених (комплексних) критеріїв, що пов'язують у необхідних пропорціях основні, найважливіші часткові параметри ІІІ.

В наш час знаходять застосування технічні, економічні і техніко-економічні критерії ефективності (рис. 2.1).

Під технічною ефективністю в більшості випадків розуміється ступінь пристосованості засобів інформаційної техніки до виконання поставлених задач.

Якщо формувати вимоги до критерію ефективності ІІІ, то в загальному вигляді критерієм ІІІ є функціонал вигляду (3.1).

Через різноманіття аспектів, з урахуванням яких можуть розглядатися критерії ефективності ІІІ, в [10] запропоновано таку їх класифікацію.

1. Часткові критерії ефективності – характеризують окрему сторону ефективності ІІІ і відображують якусь одну характеристику ІІІ (точність,

надійність, швидкодію і т. п.). Проте ефективний ІІ за одним з цих критеріїв, може виявитися не оптимальним за іншим критерієм.

2. Узагальнені критерії ефективності – характеризують загальну ефективність ІІ у цілому і є функцією часткових критеріїв.

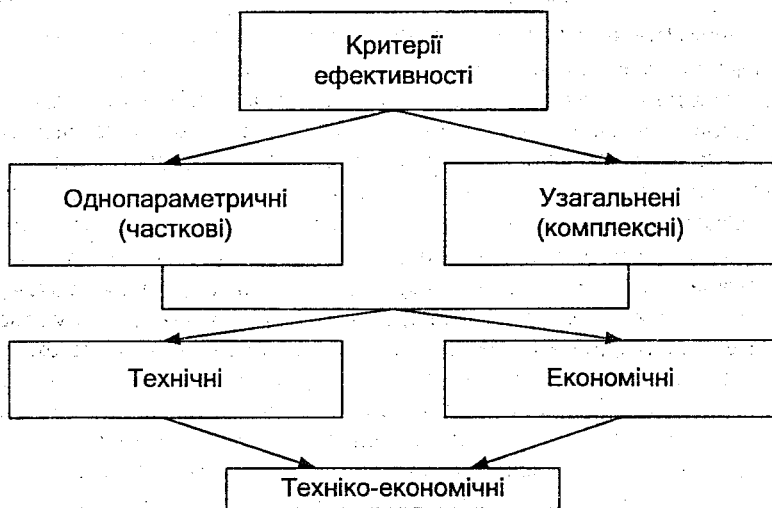


Рисунок 2.1 – Узагальнена класифікація критеріїв ефективності

Як часткові, так і узагальнені критерії можуть бути якісними і кількісними. Якісний критерій показує, досягнута або не досягнута мета (ефект), поставлена перед ІІ. Цей критерій ефективності можна розглядати як той, що приймає тільки два значення: 1 – якщо мета досягнута, 0 – у протилежному випадку. Кількісний критерій є деякою величиною, що характеризує в чисельному вигляді виконання ІІ його функції. Цей критерій приймає безперервний або дискретний ряд значень. При цьому прагнуть одержати чисельне значення критерію в межах від 0 до 1.

Технічні критерії ефективності застосовують, коли фіксовані затрати на придбання і функціонування ІІ (одержання максимального ефекту при заданих затратах).

Економічною ефективністю технічних засобів називають ступінь їхньої відповідності умові, коли економічний ефект від використання засобів повинен окупили затрати на їхню розробку, виробництво й експлуатацію за заданий час. Основними показниками даного критерію є:

- капітальні вкладення, необхідні для здійснення заходів щодо впровадження ІІ;
- продуктивність праці (у розрахунку на одного працюючого);
- термін окупності капітальних вкладень;
- собівартість продукції об'єкта, на якому використовується новий ІІ;

– сума річного економічного ефекту.

Критерії економічної ефективності застосовуються, якщо різні варіанти технічних рішень порівнянні за технічними параметрами. Необхідно відзначити, що в деяких випадках вплив нових ІІ не відображається прямо на економії в натуральному або грошовому вираженні, проте їхнє впровадження приводить до важливих соціально-економічних наслідків: усунення шкідливої і важкої праці; підвищення безпеки роботи; поліпшення соціально-гігієнічних умов праці й ін. Цей результат називають "соціальною ефективністю" [11].

На підставі вищерозглянутих критеріїв бачимо, що при розробці ІІ і ІС важливо не тільки забезпечити необхідні технічні характеристики, але і врахувати затрати на їх одержання. Цій вимозі відповідають техніко-економічні критерії. Найбільш поширеним узагальненим техніко-економічним критерієм є критерій вигляду [1]

$$Q = (\text{ефект})/(\text{витрати}). \quad (2.1)$$

Цей критерій ефективності можна розглядати як основу синтезу нових критеріїв ефективності ІІ. Слід також відзначити, що технічний ефект обумовлює інші види ефектів (соціальний, військовий і ін.). Проте виявлення зазначеного складеного ефекту в багатьох випадках є надзвичайно складною задачею. Тому при оцінюванні ефективності різних варіантів інформаційних пристроїв зазвичай достатньо порівняти технічний ефект і витрати. Узагальнений критерій ефективності міг би слугувати і єдиним показником якості виробу (ІІ).

2.3 Вимоги до критеріїв ефективності

Розробка критерію ефективності є евристичною задачею, вирішення якої залежить від запропонованих вимог. Сукупність цих вимог узагальнена та сформульована в роботі [12].

1. Показність – відображати основне призначення ІІ, виходячи з мети проектування й оптимізації.
2. Чисельність – виражатися в чисельній формі.
3. Межа – мати цілком певні й обґрунтовані межі.
4. Конкретність – мати ясний фізичний зміст.
5. Простота – мати порівняльну простоту і наочність.
6. Універсальність – забезпечувати можливість порівняння різних варіантів у різних умовах, наприклад бути нормованим.
7. Оптимальність – забезпечувати можливість вирішення задачі оптимізації.
8. Індивідуальність – забезпечувати можливість урахування індивідуальних вимог, наприклад шляхом введення вагових коефіцієнтів.

9. Прогноз – забезпечувати можливість прогнозування шляхів підвищення ефективності ІІІ.

10. Комплексність – забезпечувати можливість комплексного техніко-економічного аналізу.

На підставі сформульованих узагальнених вимог проведемо порівняльний аналіз відомих критеріїв ефективності з метою виявлення таких, що найбільш повно відповідають цим вимогам.

2.4 Аналіз однопараметричних критеріїв ефективності

У роботах [1, 4, 13] запропоновані різні види однопараметричних критеріїв ефективності. Найхарактерніші з них подано в табл. 2.1, де використовуються такі позначення: $V_b(t, \tau)$ – реальний об'єм інформації, що одержується в процесі контролю і керування; $H_0(t, \tau)$ – кількість інформації, що залишилася на виході ІІІ після обробки; t – поточний момент часу; τ – момент часу, відносно якого виконується робота; $G_0(t, \tau)$ – вага (об'єм) автоматичної системи контролю та керування (АСКК); $G_e(t, \tau)$ – вага (об'єм) устаткування для експлуатації АСКК; C_i – річні експлуатаційні витрати; $C_{\text{роз}}$ – вартість розробки; C_r – вартість виготовлення; n – гарантована кількість років роботи ІІІ; τ_0 – середня інтенсивність відмов системи без урахування перетворювачів інформації; λ_0 – середня інтенсивність відмов системи без урахування перетворювачів інформації; λ_m – середня інтенсивність відмов перетворювачів інформації; $D_p(t, \tau)$ – повний прибуток від розв'язання даної задачі або використання даних засобів (різниця реального прибутку і витрат, тобто "прибуток"); $D_t(t, \tau)$ – ідеальний прибуток від розв'язання задачі або використання даних засобів (ідеальний прибуток – це різниця максимально можливого прибутку, що при заданих умовах може бути отриманий засобами "без урахування витрат", і прибутку одержуваного при розв'язанні цієї задачі без застосування даних засобів); $H_0(t, \tau)$ – ентропія об'єкта, що характеризує невизначеність до початку процесу контролю і керування; $H_t(t, \tau)$ – ентропія об'єкта, що залишилась, після контролю і керування.

У табл. 2.2 наведено результати аналізу поданих у табл. 2.1 однопараметричних критеріїв відповідно до сформульованих в п. 2.3 вимог.

Як видно з таблиці, усі розглянуті критерії не забезпечують розв'язання задач техніко-економічного аналізу, не забезпечують можливості прогнозування шляхом підвищення ефективності й урахування індивідуальних вимог до конкретного ІІІ. Більшість із них не мають цілком певних і обґрунтованих меж, що властиво всім однопараметричним критеріям ефективності. Проте інформаційний критерій (6) з табл. 2.1, запропонований Кузьмінім І. В., найповніше відповідає поставленим вимогам [1].

Таблиця 2.1 – Однопараметричні критерії ефективності

Номер критерію	Домінуючі параметри	Вид критерію	Назва критерію	Зміст
1	Кількість інформації	$V_b(t, \tau) = H_0(t, \tau)$	Інформаційний критерій	Пристрій вважається ідеальним, якщо при експлуатації працює без втрати інформації
2	Вага або об'єм ПІ	$G(t, \tau) = G_0(t, \tau) + G_e(t, \tau)$	Критерій ваги або об'єму	З погляду економіки, чим більша вага (об'єм), тим більші витрати
3	Вартість	$C_\Sigma = t \sum_i^n C_i + C_{\text{роз}} + C_r$	Критерій вартості	Кількість грошей, необхідних для придбання і функціонування ПІ у даній системі за час роботи
4	Надійність	$\tau = \frac{3600}{\lambda_b + \lambda_y}$	Критерій системної надійності	Середній час безвідмовної роботи ПІ у даній системі за час роботи
5	Повний прибуток і ідеальний прибуток	$D = D_p(t, \tau) / D_t(t, \tau)$	Ігровий критерій	Показує ступінь ризику або ступінь програшу будь-якої дії
6	Кількість інформації до і після оброблення	$E_p(t, \tau) = [H_0(t, \tau) - H_i(t, \tau)] / H_0(t, \tau)$	Інформаційний критерій	Відношення реальної і потенційної інформаційної можливості ПІ

2.5 Аналіз багатопараметричних критеріїв ефективності

У роботах [1, 8, 11, 12, 14] запропоновані різні види багатопараметричних критеріїв ефективності. Найхарактерніші з них подані в табл. 2.3, де використовуються такі позначення: λ_0 – середня інтенсивність відмов ІС без урахування ПІ; λ_y – середня інтенсивність безвідмовної роботи ПІ; V – швидкість ПІ (кількість перетворень за секунду); C_y – вартість перетворювача інформації; γ – похибка вимірювального пристрою; ε – енергія споживана від досліджуваного об'єкта; τ_i – час проведення вимірювань; C_0 – вартість ІС без урахування вартості ПІ; \bar{R} – інформаційна продуктивність (біт/с); K_{ep} – коефіцієнт ефективності реальної АСКК; K_{en} – коефіцієнт ефективності потенційної АСКК; m – кількість вузлів, які проходить інформаційний потік від користувача до ЕОМ і в зворотному напрямку; t_j – час очікування початку обробки інформації в j -му пристрої ІС; T_{0y} – час реакції j -го елемента вузла ІС; Φ – інтегральна імовірнісна оцінка можливості розв'язання задачі реальним ПІ; Φ_{oi} – інтегральна імовірнісна оцінка мож-

ливості розв'язання задачі потенційним ІІ; b_i – технічний параметр ІС;
 C_m – вартість ІС.

Таблиця 2.2 – Результати аналізу однопараметричних критеріїв

Номер критерію	Показність	Чисельність	Межа	Конкретність	Простота	Універсальність	Оптимальність	Індивідуальність	Прогноз	Комплексність	Сумарна оцінка
1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	+7
2	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	+6
3	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	+7
4	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	+6
5	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	+6
6	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	+8

Таблиця 2.3 – Багатопараметричні критерії ефективності ІІ

Номер критерію	Домінуючі параметри ІІ	Вид критерію	Назва критерію	Фізичний зміст
1	2	3	4	5
1	Точність і надійність	$Q_1 = 3600\bar{R}/(\lambda_0 + \lambda_y)$	Інформаційно-надійнісний критерій	Оцінка сумарної кількості інформації, що передана через ІІ за час безвідмовної роботи ІІ
2	Швидкість і надійність	$Q_2 = 3600V/(\lambda_0 + \lambda_y)$	Надійнісно-швидкісний критерій	Загальна кількість обробленої інформації, переданої через ІІ за час безвідмовної роботи ІІ
3	Швидкість і вартість	$Q_3 = V/C_y$	Динамічно вартісний критерій	Кількість перетворень у секунду, що припадає на одиницю витрат
4	Похибки ІІ	$f_\varepsilon = \gamma^2 \varepsilon \tau_l$	Енергетичний поріг чутливості	Кількість енергії, що споживається від об'єкта вимірювання за час вимірювання
5	Точність, надійність і вартісний параметр $(C_y)_i$	$Q_5 = \frac{3600 \cdot \bar{R}}{(\lambda_0 + \lambda_y)} \times \frac{1}{(C_0)_i + (C_y)_i}$	Інтегральний інформаційний критерій	Оцінка сумарної кількості інформації, переданої через ІІ за час безвідмовної роботи системи, яка припадає на одиницю її вартості
6	Коефіцієнт ефективності	$Q_6 = K_{ep}/K_{en}$	Узагальнений статичний критерій ефективності	Коефіцієнт корисного використання ІІ у даних умовах

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4	5
7	Час очікування і час обробки інформації	$T_p = \sum_{i=1}^m (t_y + T_{oy})$	Критерій ефективності мережі масового обслуговування	Чим менший час передачі, очікування й обробки інформації тим ефективніший пристрій (система)
8	Можливість обробки інформації	$P_1 = \Phi/\Phi_{oi}$	Імовірнісний критерій ефективності	Інтегральна оцінка можливості виконання задачі на необхідному рівні розвитку техніки
9	Технічні показники і вартісні параметри	$\eta_{opt} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{\frac{C_y}{C_m} \sum_{i=1}^n b_i}$	Критерій практичної оптимальності	Коефіцієнт оптимальності системи

У табл. 2.4 наведено результати аналізу поданих у табл. 2.3 багатопараметричних критеріїв відповідно до сформульованих в п. 2.3 вимог.

Таблиця 2.4 – Вимоги до багатопараметричних критеріїв ефективності

Номер критерію	Показність	Чисельність	Межа	Конкретність	Простота	Універсальність	Оптимальність	Індивідуальність	Прогноз ефективності	Комплексність	Сумарна оцінка
1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	+6
2	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	+7
3	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	+8
4	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	+7
5	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	+8
6	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	+6
7	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	+6
8	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	+4
9	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	+7

Як видно з таблиці, жоден з розглянутих багатопараметричних критеріїв не відповідає всім перерахованим вище вимогам. Проте їх сумарна оцінка, як правило, вища, ніж в однопараметричних критеріїв. При цьому найвищий рейтинг у критеріїв 3 та 5, які відносяться до техніко-економічних критеріїв і враховують більше п'яти основних параметрів.

Контрольні запитання та вправи

1. Дайте означення поняття «якість інформаційної системи».
2. Дайте означення «ефективність інформаційної системи».
3. Перерахуйте основні показники економічної ефективності.
4. Як аналітично характеризується технічна ефективність ІС та ІІ?
5. Чим відрізняються критерії технічної ефективності та оптимальності?
6. Наведіть узагальнену класифікацію критеріїв ефективності ІІ.
7. Вкажіть переваги та недоліки часткових та узагальнених критеріїв ефективності.
8. Обґрунтуйте основні вимоги до критеріїв технічної ефективності.
9. З якою метою рекомендується використання нормованих критеріїв ефективності?
10. Якщо нормований критерій ефективності лежить в межах $(0 \div 1)$, а в результаті розрахунків отримано значення більше за одиницю, про що це свідчить?

3. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Під технічною ефективністю в більшості випадків розуміється ступінь пристосованості засобів інформаційної техніки до виконання поставлених завдань (функцій). Оцінювання ефективності здійснюється за допомогою критеріїв або показників ефективності. Вибір конкретних критеріїв ефективності залежить від призначення системи і вимог, що висуваються до неї. Загальні рекомендації, що описані в [12], доцільно враховувати при виборі або розробці критеріїв ефективності. Вибір критерію для системи завжди пов'язаний з деяким (великим або малим) ризиком. При цьому необхідно враховувати призначення системи, її взаємозв'язок з іншими частинами, якщо система не автономна.

3.1 Узагальнені вимоги до формування критеріїв ефективності інформаційних систем

Найбільш детально вимоги до формування критеріїв ефективності інформаційної системи сформульовані в [2] та подані з деякими скороченнями та коригуванням в даному пункті.

Якщо формалізувати вимоги до критерію ефективності системи, то в загальному вигляді критерієм ефективності ІС є функціонал вигляду

$$E=F(X, Y), \quad (3.1)$$

де $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ – вектор, що характеризує параметри системи, якими можна управляти і, таким чином, змінювати числове значення критерію;

$Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ – вектор параметрів системи, які не піддаються управлінню, але впливають на значення критерію ефективності.

Значення E визначається алгоритмічними, структурними, схемними і конструктивними рішеннями системи, а також умовами застосування. Кількість параметрів, які впливають на критерій ефективності, може бути дуже велика. Але для конкретного варіанта системи лише деякі з них значною мірою змінюють величину критерію, а велика частина впливає відносно слабо або майже не впливає. Для спрощення дослідження необхідно вибирати мінімальну кількість параметрів, тобто обмежитися тільки суттєвими. Для аналізу впливу параметра на критерій можуть використовуватися методи кореляційного та регресійного аналізу.

Якщо критерієм є точність ІС, то керованими змінними (параметрами) можуть бути коефіцієнти передачі окремих частин системи, кількість рівнів квантування, смуга пропускання, коефіцієнти зворотного зв'язку, сталі часу і т. п. Некерованими параметрами, що впливають на точність системи,

є навколишні умови (температура, вологість і т. п.), рівень перешкод, радіації та ін.

Конкретне виділення параметрів, особливо керованих, залежить від ступеня деталізації моделі системи. При агрегатному принципі побудови систем необхідно обмежитися рівнем пристроїв агрегатних комплексів.

Більшість з керованих параметрів можуть змінюватися тільки в певних межах; тобто існує обмеження вигляду $X \in M$, де M – допустима область зміни параметрів.

Некеровані параметри поділяються на три групи:

- 1) фіксовані, значення яких відомі, але змінюватися вони не можуть;
- 2) випадкові параметри, закони розподілу яких відомі;
- 3) невизначені випадкові параметри, для яких відомі тільки області змін, але невідомі закони розподілу ймовірностей.

Фіксовані фактори для конкретної системи можна не враховувати. Якщо згідно з проведеним вище поділом позначити через Y^I вектор випадкових некерованих параметрів, закони розподілу яких відомі, а через Y^{II} – вектор невизначених випадкових параметрів, то вираз (3.1) можна переписати у вигляді

$$E = F(X, Y^I, Y^{II}). \quad (3.2)$$

Вирази (3.1), (3.2) можуть характеризувати ефективність проєктованих і функціонуючих систем. При оптимальному проєктуванні завданням математичного синтезу системи є пошук екстремуму функціонала критерію при заданих обмеженнях на керовані параметри та врахуванні всієї доступної інформації про невизначені параметри.

Через різноманіття аспектів, з яких можуть розглядатися критерії технічної ефективності ІС, корисно провести їх класифікацію.

Узагальненим критерієм ефективності називається критерій, що вимірює загальну ефективність системи в цілому [15].

Частковий критерій ефективності характеризує окрему сторону системи. Він збігається з тією чи іншою характеристикою системи – характеристикою точності, швидкодії, надійності і т. п. Система, оптимальна за одним з часткових критеріїв, може виявитися далеко не оптимальною за іншими критеріями. При проєктуванні систем природно прагнути не до екстремального значення будь-якої часткової характеристики, а до загальної оптимальності системи, тобто до екстремуму узагальненого критерію.

Узагальнений критерій, очевидно, є функцією часткових критеріїв

$$E = \Phi(E_1, E_2, \dots, E_m). \quad (3.3)$$

Крім того, узагальнений критерій в деяких задачах можна подати як функціонал від відповідних керованих і некерованих параметрів системи.

При цьому особливої необхідності введення часткових критеріїв, очевидно, немає.

Як узагальнені, так і часткові критерії можуть бути якісними і кількісними.

Якісний критерій характеризує, досягнута чи не досягнута мета (ефект), поставлена перед системою. Цей критерій ефективності можна трактувати як такий, що приймає тільки два значення: 1 – якщо мета досягнута, і 0 – в протилежному випадку. Наприклад, чи отримана при вимірюванні (контролі) задана достовірність (1) або не отримана (0). Аналогічний сенс можна надати забезпеченню роботоздатності системи. Для якісного критерію, природно, мати встановлений зв'язок з параметрами системи, певні значення або інтервал зміни яких дозволяє отримати числове значення критерію (1 або 0).

Кількісний критерій – це деяка величина, що характеризує виконання системою її функцій. Цей критерій приймає безперервний або дискретний ряд значень. Прикладами кількісних критеріїв є максимальна і квадратична помилка, швидкодія, достовірність контролю, імовірність виконання завдання в певні проміжки часу та ін.

Крім такого поділу критеріїв використовується так званий *умовний критерій*. Умовним критерієм ефективності називають критерій, який обчислюється в припущенні, що будь-які події або випадкові величини, що впливають на критерій ефективності, сталися або прийняли певні значення. Умовні критерії частіше всього використовуються в задачах дослідження надійності складних технічних систем. *Безумовний критерій* визначається як математичне очікування умовного.

До цих пір розглядалися критерії ефективності, що характеризують систему в цілому. Для системи, що складається з l підсистем (частин), загальний (сумарний) критерій може визначатися через критерії окремих підсистем $E^{(i)}$ як

$$E = \psi(E^{(1)}, E^{(2)}, \dots, E^{(l)}), \quad (3.4)$$

$$\text{де } E^{(i)} = F_i(X^{(i)}, Y^{(i)}) \quad (i = 1, 2, \dots, l),$$

при цьому $X^{(i)}$ – вектор керованих параметрів i -ї підсистеми;

$Y^{(i)}$ – вектор некерованих параметрів i -ї підсистеми.

Як підсистеми конкретної ІС можна розглядати її частини, що виконують будь-яку одну функцію. Так, наприклад, в системах автоматичного контролю можна виділити підсистеми, що виконують функцію контролю, періодичного вимірювання, вимірювання за викликом і т. п. Ефективність виконання системою окремих функцій, природно аналізується простіше, ніж ефективність всієї системи.

Критерій ефективності системи в загальному випадку залежить не тільки від керованих та некерованих параметрів з відомими законами роз-

поділу, але і від невизначених некерованих параметрів (чинників). З цієї причини в певних випадках не можна знайти навіть статистичні характеристики критерію й виникає статистична невизначеність у знаходженні його числових значень.

Найчастіше при дослідженні ефективності систем, невизначені фактори ігноруються і завдання обчислень критеріїв розглядаються в детермінованій або в статистичній постановках. У детермінованій постановці кожному варіанту системи з вибраною структурою і параметрами ставиться у відповідність єдине значення критерію. У статистичній постановці вибраному варіанту відповідає значення критерію з певною імовірністю; в цьому випадку говорять також про ризик, що виникає через статистичний характер некерованих параметрів. В цих постановках невизначені фактори не враховуються, а критерій ефективності приймає простіший вигляд:

$$E = F(X, Y'). \quad (3.5)$$

Ціна цього спрощення – неточне обчислення істинного значення критерію. У правильно сформульованій моделі повинні враховуватися всі існуючі невизначені фактори (параметри).

Невизначені фактори можна розділити на дві підгрупи:

а) невизначені фактори, що з'являються через недостатню вивченість певних процесів і величин. У теорії дослідження операцій такі невизначеності називають природними;

б) невизначеності, що полягають у неточному знанні деяких параметрів критерію ефективності. Ці невизначеності теж можна відносити до природних, хоча це і умовно.

Прикладом невизначеностей першої підгрупи є невизначеності в законах розподілу ймовірностей перешкод, параметрів вібрацій, радіаційних впливів та інших зовнішніх факторів і т. п. Прикладом невизначеності другої підгрупи є невизначеність у розподілі загальної похибки складної вимірювальної системи на систематичну і випадкову складові.

Невизначеності залежать від ступеня інформованості проектувальника системи про некеровані параметри, що впливають на ефективність системи. Збільшення інформованості, наприклад, проведенням спеціальних досліджень або уточнень замовника може зменшити вплив некерованих факторів на ефективність.

Основою для вибору варіанта системи в умовах невизначеності є принцип гарантованого результату. Суть цього принципу полягає в тому, що при даному критерії ефективності і даному рівні інформованості в невизначених чинниках оцінювання ефективності варіантів системи повинне здійснюватися на основі отримання гарантованого (максимально гарантованого) значення критерію ефективності.

У математичній формі гарантованою оцінкою ефективності є

$$E = \inf_{Y'' \in N} E(X, Y', Y''), \quad (3.6)$$

де N – область зміни невизначених некерованих параметрів (неконтрольованих факторів).

Таким чином, при оцінюванні ефективності системи відповідно до принципу гарантованого результату значення розглянутого критерію буде забезпечено при будь-яких значеннях некерованих параметрів, що впливають на ефективність. Прикладом використання принципу гарантованого результату в області виміральної техніки є нормування похибок вимірвальних засобів за класами точності.

Підхід на основі гарантованого результату є обережним, але обґрунтованим, якщо правильно враховується вся доступна інформація про невизначені чинники. Саме поняття гарантованого результату залежить від прийнятого критерію. Так, якщо критерієм є не максимальна похибка, а середньоквадратичне відхилення, то гарантованою оцінкою загальної похибки σ_x є:

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_i \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i < j} \sigma_{x_i} R_{x_i, x_j}}, \quad (3.7)$$

де σ_{x_i} – середньоквадратичні відхилення (або їх статистичні оцінки) окремих доданків;

R_{x_i, x_j} – швидкість отримання інформації.

Невизначені фактори ускладнюють оцінювання ефективності. У тому випадку якщо є підстава вважати, що підхід на основі принципу гарантованого результату є надто обережним, може бути використане те або інше усереднення E по Y'' . Якщо вектор статистично визначених і невизначених некерованих параметрів складається з незалежних випадкових факторів $Y = (Y_1, \dots, Y_m)$, то новий, усереднений критерій має вигляд:

$$\bar{E} = \int \dots \int \varphi(x, y) f_1(y_1) \dots f_m(y_m) dy_1, \dots, dy_m, \quad (3.8)$$

де $f_i(y_i)$ – щільність розподілу i -го параметра;

$\varphi(x, y)$ – оператор зв'язку між параметрами x та y .

При цьому повинні бути вибрані тією чи іншою мірою обґрунтовані закони розподілу невизначених факторів.

Один із способів позбавлення від невизначених факторів, який запропонований Л. Гурвіцем, описується формулою

$$E' = \alpha \max_Y E(Y) + (1 - \alpha) \min_Y E(Y), \quad (3.9)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1.$$

Величина α вибирається з певним обґрунтуванням. Якщо $\alpha = 0$, то (3.9) дає принцип гарантованого результату. В (3.9) екстремуми вибираються або по всій області некерованих параметрів, або тільки в області невизначених параметрів.

Якщо отримана математична модель системи, то вона може бути використана для оптимізації системи, тобто для точного або наближеного знаходження в допустимій області значень керованих параметрів, які максимізують або мінімізують (залежно від постановки завдання) критерій якості системи. При цьому, коли невизначені фактори враховуються, то оптимальним гарантованим варіантом системи є такий вектор параметрів X_0 , для якого досягається екстремум (максимум або мінімум) критерію:

$$\inf_{Y \in N} F(X_0, Y) = \max_{Y \in M} \inf_{Y \in N} F(X, Y),$$

де через Y позначені всі некеровані параметри.

Якщо невизначені фактори не мають суттєвого значення, то формальним підходом до вибору оптимального варіанта є класичні методи розв'язання екстремальних задач (диференціальне та варіаційне числення), а для більш складних моделей – методи математичного програмування (лінійного, нелінійного, дискретного, динамічного, стохастичного та ін.)

У практиці розробки ІС найбільш часто оптимізують якийсь один з часткових критеріїв (наприклад, точність або швидкодія), обмежуючи рівні решти часткових критеріїв допустимими значеннями.

Отриманий в результаті оптимізації розв'язок покращує якість системи тільки тоді, коли використовувана модель достатньо адекватна системі. Тому необхідна перевірка розв'язку з метою визначення його відповідності реальній дійсності.

При розробці систем важливо не тільки забезпечити необхідні технічні характеристики, але і знати витрати на їх отримання. Тому слід велику увагу приділяти проблемі загальної ефективності, яка об'єднує технічну та економічну ефективність систем. Основна увага при цьому приділяється пошуку узагальненого критерію ефективності, який би дозволив пов'язати характеристики систем з витратами на їх отримання і таким чином, однозначно охарактеризувати загальну ефективність.

Існує зв'язок цієї проблеми з проблемою якості системи. Під якістю системи (виробу) зазвичай розуміють сукупність функціональних, технічних і економічних характеристик, що визначають ступінь її придатності для використання за заданим призначенням. Узагальнений критерій ефективності міг би слугувати і єдиним показником якості системи.

Розроблено велику кількість таких критеріїв.

Наприклад, узагальнений критерій ефективності інформаційних систем вигляду [2]

$$E_I = \frac{C_v - C_s}{C_{v_i}}, \quad (3.10)$$

де C_v – результат використання системи (реальний дохід);

C_s – витрати на створення і експлуатацію системи;

C_{v_i} – результат застосування системи при виконанні всіх функцій і відсутності витрат на їх здійснення (ідеальний дохід).

Чисельник (3.10) дорівнює прибутку, одержуваному від експлуатації системи.

Як критерій ефективності систем можна використовувати імовірність виконання поставлених перед ними завдань. Стосовно до вимірювальних систем цей критерій можна сформулювати як імовірність виконання вимірювання із заданою точністю. Відповідний вираз має вигляд [2]

$$E = P_r \left(p_0 E_0 + \sum_{i=1}^n p_i E_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n p_{ij} E_{ij} + \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i < j \\ i < k}}^n p_{ijk} E_{ijk} + \dots + p_{1,\dots,n} E_{1,\dots,n} \right),$$

де P_r – коефіцієнт готовності системи;

p_0 – імовірність того, що всі елементи роботоздатні;

p_i – імовірність відмови i -го елемента;

p_{ij} – імовірність відмови i -го і j -го елементів;

$p_{1,\dots,n}$ – імовірність відмови всіх елементів;

$E_0, E_i, E_{ij}, E_{1,\dots,n}$ – умовні критерії ефективності, що дорівнюють умовним імовірностям виконання завдання в припущенні безвідмовності всіх елементів, відмови i -го елемента і т. п.

Умовні критерії ефективності передбачаються незалежними від моментів виникнення відмов елементів системи на заданому інтервалі часу.

При обчисленні цього критерію повинні бути попередньо визначені умовні імовірності безвідмовної роботи і умовні критерії, які можна знайти тільки на основі експериментальних даних і досвіду експлуатації системи, що для заново проєктованих систем у більшості випадків ускладнено.

У технічній літературі іноді використовується підхід до конструювання узагальненого критерію як до добутку приватних критеріїв, нормованих щодо деяких номінальних значень показників для отримання безрозмірних співмножників.

Отже слід відмітити, що розглянуті підходи до конструювання критеріїв ефективності є узагальненими. Тому для конкретних ІС розробники застосовують часткові критерії, які враховують специфіку ІС.

3.2 Часткові критерії оцінювання ефективності інформаційних систем

Для порівняльного оцінювання ефективності різних систем використовується частковий критерій «питомої швидкості» передачі інформації, тобто відношення швидкості передачі інформації до смуги частот F_c , займаної в каналі зв'язку [8].

$$R = \frac{I_T}{F_c T_c},$$

де T_c – час передачі сигналу;

I_T – кількість інформації, що передається за час T_c .

У тих випадках, коли потужність передавача жорстко обмежена (наприклад, в системах космічного зв'язку), як критерій ефективності застосовується коефіцієнт використання потужності сигналу

$$\beta = \frac{I_T}{\frac{P_c}{P_\xi} F_c T_c},$$

де $\frac{P_c}{P_\xi}$ – відношення потужності сигналу до потужності завади в каналі передачі інформації.

Коефіцієнт β відіграє велику роль при порівняльному оцінюванні та енергетичному розрахунку радіоканалів з великими потоками інформації. Він показує, у скільки разів середня потужність сигналу повинна перевищувати середню потужність завад для забезпечення заданої швидкості передачі інформації на 1 Гц смуги частот, займаної у каналі зв'язку.

Ефективність інформаційних систем також можна характеризувати коефіцієнтом

$$v = \frac{I_T}{F_c T_c \log_2 \frac{P_c}{P_\xi}},$$

який отримав назву питомої змістовності сигналу, що визначає кількість інформації в одиниці об'єму сигналу.

Для оцінювання ефективності автоматизованих систем контролю (АСК) використовується критерій у якого характеристики X_i , об'єднані в один функціонал [5]

$$E = F(X_i),$$

що досягає відповідного екстремуму (мінімуму або максимуму) цього функціонала. Такими критеріями є ризик контролю або дохід, що принесений об'єктом контролю. Однак складність розрахунку втрат і доходів не дозволяє в ряді випадків використовувати такі узагальнені критерії та перевага віддається критеріям з обмежувальними нерівностями.

При використанні критерію з обмежувальними нерівностями найбільш ефективна АСК, для якої забезпечуються необхідні значення декількох показників ефективності при відповідному екстремумі одного з показників ефективності.

Оскільки правильним є техніко-економічне оцінювання ефективності АСК, потрібно в обмеженні задавати витрати на АСК або показники ефективності АСК, які мають зв'язок з показниками ефективності застосування об'єктів контролю.

Оцінювання ефективності АСК лише з технічних позицій не дозволяє правильно оцінити доцільність використання АСК для конкретного об'єкта контролю або класу об'єктів контролю, оскільки витрати на розробку, виготовлення і експлуатацію АСК зникають з поля зору. Тому тільки техніко-економічне оцінювання дає необхідну і достатню інформацію для визначення ефективності АСК. При задаванні витрат необхідно максимізувати (мінімізувати) показник, що має зв'язок з показником ефективності застосування об'єктів контролю.

Ефективність застосування об'єкта контролю можна характеризувати такими ймовірностями [5]:

$P(t)$ – ймовірність роботоздатності об'єкта контролю, тобто ймовірність відсутності в об'єкті невиявленої відмови в момент часу t ;

$P_r(t)$ – ймовірність готовності об'єкта контролю, тобто ймовірність того, що об'єкт буде знаходитися в момент t в роботі, а не в обслуговуванні, і при цьому в ньому не буде невиявленої відмови;

$P_{\text{вп}}(t)$ – ймовірність виконання завдання об'єктом контролю в момент часу t ;

$P_i(t)$ – ймовірність інформації, тобто ймовірність відсутності невиявлених спотворень у вихідній інформації об'єкта контролю.

Якщо ефективність застосування об'єкта контролю характеризується ймовірністю виконання ним завдання $P_{\text{вп}}(t)$, то цю ймовірність потрібно використовувати як показник ефективності АСК.

Якщо ефективність застосування об'єкта контролю характеризується ймовірністю його роботоздатності $P(t)$ в момент кінця виконання завдання, то цю ймовірність доцільно використовувати як показник ефективності АСК в тому випадку, коли можлива спільна оптимізація об'єкта контролю і АСК або можливий контроль під час виконання завдання об'єктом контролю.

У загальному випадку вимоги до показників ефективності АСК повинні визначатися з призначення об'єкта контролю. Проте у ряді випадків такі показники не бувають задані. Тоді можна опиратися на вимоги до надійнісних характеристик об'єкта контролю. Якщо ймовірність $P(t)$ безпосередньо не задана, а задана ймовірність безвідмовної роботи $P_6(\tau_3)$ об'єкта контролю за час τ_3 , то необхідну ймовірність роботоздатності $P_{тр}(t)$ об'єкта контролю можна визначити із співвідношення [6]

$$P_{тр}(t) \approx 1,1P_6(\tau_3) - 0,1.$$

Тоді в кінці виконання завдання ймовірність наявності в об'єкті контролю невиявленої відмови через недостовірність АСК зростає не більше ніж на 10 % порівняно з випадком виникнення цих відмов тільки через недостатню надійність об'єкта контролю.

Ймовірність роботоздатності $P(t_1)$ об'єкта контролю в момент кінця 1-го етапу керування якістю характеризує відсутність в ньому невиявлених відмов у цей момент. Цю ймовірність використовують як показник ефективності АСК в тому випадку, коли задається вимога до ймовірності безвідмовної роботи $P_6(\tau_3)$ об'єкта контролю за час τ_3 і АСК або неможливий контроль під час виконання завдання об'єктом контролю.

Використання ймовірності $P(t_1)$ замість ймовірності $P(t)$ дозволяє при оцінюванні ефективності АСК виключити необхідність врахування зміни стану об'єкта контролю після технічного обслуговування, що знижує обсяг обчислень при оцінюванні ефективності АСК.

Необхідне значення $P_{тр}(t_1)$ визначається за формулою

$$P_{тр}(t_1) = \frac{1,1P_6(\tau_3) - 0,1}{P_6(\tau_3)}.$$

У цьому випадку кількість невиявлених відмов в об'єкті контролю в кінці виконання завдання за рахунок недостовірності контролю на етапі керування його якістю буде не більше ніж на 10 % перевищувати кількість відмов, що виникають в об'єкті контролю під час виконання ним завдання. Завдання таким чином вимог до критерію ефективності АСК в більшості випадків задовольняє потреби практики.

Як приклад, нехай $P_6(\tau_3) = 0,99$, тоді $P_{тр}(t_1) = 0,999$.

Якщо ефективність застосування об'єкта контролю характеризується ймовірністю його готовності $P_r(t)$, то цю ймовірність потрібно використовувати як показник ефективності АСК. У тому випадку, коли вимоги до ймовірності $P_r(t)$ безпосередньо не задані, вони визначаються таким чином. Якщо задано необхідний коефіцієнт $K_{г,тр}$ готовності об'єкта контролю або ймовірність підготовки $P_{п,тр}(t_k - t_n)$ об'єкта контролю за час $t_k - t_n$, де

t_k і t_n відповідно моменти часу початку і кінця підготовки, то необхідна ймовірність готовності дорівнює [6]

$$P_{г.тр}(t) = 1,1K_{г.тр} - 0,1$$

або

$$P_{г.тр}(t_k) = 1,1P_{п.тр}(t_k - t_n) - 0,1.$$

У цьому випадку ймовірність наявності невиявлених відмов у об'єкті контролю в момент часу t або t_k буде складати не більше 10% імовірності знаходження його в обслуговуванні, а не в роботі.

Вимоги до правильності вихідної інформації $P_{и.тр}(\tau_3)$ за час виконання завдання об'єктом контролю визначаються, виходячи з його призначення. Якщо $P_{и.тр}(\tau_3)$ не задана, вона визначається за формулою

$$P_{и.тр}(\tau_3) = 1,1 - \frac{0,1}{K_{г.тр}}$$

У цьому випадку невиконання завдання об'єктом контролю за рахунок невиявлених спотворень у його вихідній інформації буде виходити в 10 разів рідше, ніж за рахунок знаходження об'єкта в обслуговуванні.

У цифрових системах передачі інформації може бути задане число θ переданих знаків, в яких можливо не виявлено спотворення одного знака. Число θ пов'язане з правильністю інформації формулою

$$P_{и}(\tau_3) = 1 - 1/\theta,$$

а час виконання завдання об'єктом контролю для оцінювання ефективності реальних АСК вибирається в цьому випадку за формулою

$$\tau_3 = \frac{\theta}{mV},$$

де m – кількість одночасно переданих в групі знаків;

V – швидкість передачі групи знаків.

У цілому ряді випадків контроль є ефективним тільки тоді, коли АСК має швидкодію, що дозволяє здійснити перевірку об'єкта контролю при справній АСК за час T_k . У цих випадках як показник ефективності АСК використовується час контролю об'єкта контролю T_k або час T_r готовності об'єкта контролю до виконання завдання. Цей час визначається власне часом контролю T_k об'єкта контролю і часом його попередньої підготовки

$T_{п.п.}$. Якщо надається можливість задати вимоги до T_k , його доцільно використовувати як показник ефективності АСКК. Якщо виділити вимоги до T_k не вдається, потрібно використовувати безпосередньо час T_r .

3.3 Узагальнений функціонально-статистичний критерій оцінювання ефективності процесу контролю та керування АСКК

При використанні критерію оцінювання ефективності автоматичних систем контролю і керування (АСКК), необхідно щоб він характеризував інформаційну здатність процесу і АСКК. Аналітичне оцінювання такої ефективності виконано в [1]:

Кількість інформації, що отримується АСКК при контролі й керуванні за інтервал часу $\tau - t$,

$$I_p(t, \tau) = H_0(t, \tau) - H(t, \tau), \quad (3.11)$$

де $H_0(t, \tau)$ – ентропія об'єкта і АСКК, що характеризує невизначеність до початку процесу контролю і керування;

$H(t, \tau)$ – залишкова ентропія об'єкта і АСКК.

Рівність (3.11) характеризує реальну інформаційну здатність АСКК. Потенційна інформаційна можливість АСКК визначається таким чином:

$$I_n(t, \tau) = H_0(t, \tau). \quad (3.12)$$

Ефективність АСКК з інформаційної точки зору можна оцінити критерієм

$$E_I(t, \tau) = \frac{I_p(t, \tau)}{I_n(t, \tau)}, \quad (3.13)$$

або з урахуванням (3.11), (3.12).

$$E_I(t, \tau) = \frac{H_0(t, \tau) - H(t, \tau)}{H_0(t, \tau)}. \quad (3.14)$$

Критерій характеризує ефективність АСКК однозначно деяким числом, що змінюється від 0 до 1. При цьому ідеальна АСКК має ефективність, рівну 1, реальна $E_I(t, \tau) < 1$. При $E_I(t, \tau) \leq 0$ застосовувати АСКК не має ніякого сенсу, тому що при $E_I(t, \tau) = 0$ вона не дає інформації, а при $E_I(t, \tau) < 0$ дає дезінформацію. Критерій враховує відношення АСКК до найголовнішої характеристики стану об'єкта – його ймовірності безвідмовної роботи, а також до точності роботи і якості алгоритму АСКК.

Однак поряд із зазначеними перевагами критерій (3.14) має недоліки:

– є статичною оцінкою ефективності, не враховує динаміки процесу контролю і керування;

– не враховує складності та вартості процесу АСКК, а також деяких інших показників (вага та об'єм АСКК і т. п.), які залежно від умов застосування можуть виявитися дуже важливими.

Критерієм, що не має вказаних недоліків, є узагальнений статистичний критерій оцінювання ефективності [1]:

$$E(t, \tau) = \frac{K_I(t, \tau)}{K_{I0}(t, \tau)}, \quad (3.15)$$

де

$$K_I(t, \tau) = \frac{I_{\max}(t, \tau)}{C_{\Sigma}(t, \tau)} \quad (3.16)$$

– узагальнена статистична характеристика реального процесу контролю і керування;

$$I_{\max}(t, \tau) = \sum_{i=1}^m I_{i, \max}(t, \tau) \quad (3.17)$$

– максимальна середня кількість інформації, що отримується за m дослідів, виконуваних найкращою АСКК з точки зору отримання $I_{\max}(t, \tau)$;

$$C_{\Sigma}(t, \tau) = C_W(t, \tau) + \Delta C_T(t, \tau) + \Delta C_G(t, \tau) + \Delta C_V(t, \tau) + \dots,$$

– математичне очікування вартості реального процесу і АСКК,

де $C_W(t, \tau) = C$ – вартість АСКК;

$\Delta C_T(t, \tau)$ – вартість витрат на отримання заданої швидкодії АСКК;

$\Delta C_G(t, \tau)$ – вартість витрат на отримання заданої ваги АСКК;

$\Delta C_V(t, \tau)$ – вартість витрат на отримання заданого об'єму системи;

$$K_{I0}(t, \tau) = \frac{I_{\max \max}(t, \tau)}{C_{\min}(t, \tau)}, \quad (3.18)$$

– узагальнена «потенційна» статистична характеристика ідеального процесу контролю і керування та АСКК;

$$I_{\max \max}(t, \tau) = \sum_{i=1}^m I_{i, \max \max}(t, \tau) = m(t, \tau) \quad (3.19)$$

– максимальна середня кількість інформації, що отримується за m дослідів, виконуваних найкращою в зазначеному раніше сенсі АСКК при максимальній невизначеності об'єкта;

$$C_{min}(t, \tau) = C_w(t, \tau)$$

– вартість ідеалізованої АСКК.

З урахуванням рівностей (3.11), (3.12), (3.16), (3.19) остаточно отримано [1]

$$E(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^m \{H_{i0}(t, \tau) - H_i(t, \tau)\} C_{i, min}(t, \tau)}{m \sum_{i=1}^m C_i(t, \tau)} \quad (3.20)$$

Таким чином, для оцінювання ефективності процесу контролю і керування АСКК необхідно:

– визначити ентропію кожної системи об'єкта і АСКК до контролю;
– визначити ентропію об'єкта і АСКК з урахуванням ентропії, обумовленої помилками АСКК при контролі й управлінні кожної системи;

– визначити середню кількість інформації, що отримується за кожен дослід;

– підрахувати початкову вартість C_{min} і остаточну реальну вартість C ;
– провести розрахунки за формулою (3.20).

Перевагою узагальненого статистичного критерію оцінювання ефективності є повнота, наочність, порівняльна простота і спільність, яка дозволяє одним числом характеризувати як весь процес контролю і керування, так і по частинах, що включають складні і прості досліді.

При цьому діапазон зміни узагальненого статистичного критерію для АСКК, що дає інформацію:

$$0 \leq E(t, \tau) \leq 1.$$

Недосконалі АСКК мають $E(t, \tau) \leq 0$. Досконалі системи підготовки мають $E(t, \tau)$, близький до одиниці.

Оцінювання ефективності АСКК за формулою (3.15) з урахуванням максимальної невизначеності об'єкта і АСКК дає ступінь наближення до потенційних можливостей. Однак з практичної точки зору можливе оцінювання ефективності АСКК за критерієм [1]

$$E(t, \tau) = \frac{K_I^*(t, \tau)}{K_{I0}^*(t, \tau)}$$

де $K_I^*(t, \tau) = \frac{I_p(t, \tau)}{C_0(t, \tau) + C_E(t, \tau)}$ – абсолютний реальний показник ефективності;

тивності;

$I_p(t, \tau)$ – реальна кількість інформації, що отримується в процесі;

$K_{I_0}^*(t, \tau) = \frac{I_1(t, \tau)}{C_0}$ – абсолютний ідеальний показник ефективності;

$I_1(t, \tau)$ – кількість інформації, що дається ідеальною (без помилки) АСКК;

$C_0(t, \tau)$ – вартість пристрою;

$C_E(t, \tau) = \alpha_E T$ – експлуатаційна вартість процесу;

T – час контролю і керування;

$\alpha_E = \frac{C_{зип} + C_{обсл}}{T_{рес}} \left[\frac{\text{грн}}{\text{од. часу}} \right]$ – постійний коефіцієнт;

$C_{зип}$ – вартість ЗПУ;

$C_{обсл}$ – вартість утримання обслуговуючого персоналу;

$T_{рес}$ – середній ресурс АСКК.

У теоретичному відношенні цікаве також оцінювання ефективності тільки алгоритму процесу без урахування апаратних помилок або тільки ефективності апаратури, що реалізує вибраний алгоритм. Ці критерії можна отримати з формули (3.15) шляхом виключення в першому випадку апаратних помилок (ідеальна АСКК), у другому випадку – помилок алгоритму (ідеальний алгоритм).

3.4 Критерії оцінювання заводо захищеності інформаційних систем

Заводостійкість – це здатність інформаційної системи протистояти шкідливій дії завод. В результаті дії завод прийняте повідомлення буде певною мірою відрізнятись від переданого. Тому заводостійкість можна характеризувати як ступінь відповідності прийнятого повідомлення переданому при заданій заводі. При порівнянні декількох систем більш заводостійкою буде та з них, яка при однаковій заводі забезпечить менше розходження між прийнятим і переданим повідомленнями.

Для характеристики ступеня відповідності прийнятого повідомлення переданому використовується кількісна міра цієї відповідності, яка вибирається по-різному залежно від характеру повідомлень.

При передачі безперервних повідомлень як критерій правильності використовується критерій середньоквадратичного відхилення прийнятого повідомлення $Y(t)$ відносно переданого $X(t)$ [1]

$$\sigma = \sqrt{|Y(t) - X(t)|^2}$$

Застосовуються також критерій абсолютного відхилення

$$\delta_{\text{абс}} = |Y(t) - X(t)|$$

і критерій найбільшого відхилення

$$\delta_{\text{max0}} = \max|Y(t) - X(t)|.$$

Для зручності порівняльного оцінювання завадостійкості різних систем розглядаються відносні відхилення

$$\gamma_{\sigma} = \frac{\sigma}{X_E}; \quad \gamma_{\text{абс}} = \frac{\delta_{\text{абс}}}{X_E}; \quad \gamma_{\text{max}} = \frac{\delta_{\text{max}}}{X_E}$$

або приведені відхилення

$$\alpha_0 = \frac{\sigma}{L_x}; \quad \alpha_{\text{абс}} = \frac{\delta_{\text{абс}}}{L_x}; \quad \alpha_{\text{max}} = \frac{\delta_{\text{max}}}{L_x},$$

де X_E – ефективне значення повідомлення;

L_x – динамічний діапазон переданих повідомлень.

Для каналу передачі інформації, що має близьку до П-подібної амплітудно-частотну і лінійну фазочастотну характеристики, то при наявності флукутаційної завади типу білого гаусова шуму середньоквадратичне значення відхилення прийнятого повідомлення щодо переданого дорівнює кореню квадратному із середньої потужності завади на виході приймача $P_{\text{л.вих}}$, а відносна величина цього відхилення виражається через корінь квадратний відношення середніх потужностей завади і сигналу на виході приймача

$$\gamma_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{P_{\xi}}{P_x}\right)_{\text{вих}}}$$

Для порівняльного оцінювання систем і практичних розрахунків часто як критерій завадостійкості приймають величину «виграшу системи»

$$B = \frac{\left(\frac{P_x}{P_\xi}\right)_{\text{вих}}}{\left(\frac{P_x}{P_\xi}\right)_{\text{вх}}}$$

де $\left(\frac{P_x}{P_\xi}\right)_{\text{вих}}$ та $\left(\frac{P_x}{P_\xi}\right)_{\text{вх}}$ – відношення середніх потужностей сигналу і завади на виході і вході пристрою.

У разі передачі дискретних повідомлень, а також безперервних повідомлень з кодоімпульсною модуляцією сигналів, як критерій правильності використовується ймовірність правильного прийому

$$p_{\text{пр}} = 1 - p_{\text{ош}}$$

де $p_{\text{ош}}$ – ймовірність помилки у відтворенні повідомлення.

У реальних умовах ймовірність помилки $p_{\text{ош}}$ дуже мала і значно менша одиниці. В цьому випадку використовують для оцінювання завадостійкості логарифмічну величину

$$S = \log \frac{1}{p_{\text{ош}}} = \log \frac{1}{1 - p_{\text{пр}}}$$

За змістом визначення завадостійкість розуміється як властивість системи передачі інформації в цілому. Однак оцінювання завадостійкості системи в цілому – складне завдання. Тому зазвичай говорять про завадостійкості окремих ланок системи: про завадостійкості передачі (зокрема, про завадостійкості коду або виду модуляції) та про завадостійкості прийому.

При оцінюванні впливу виду модуляції на завадостійкість системи виконують порівняння різних видів модуляції з амплітудною. З цією метою застосовується коефіцієнт

$$R_{\text{н}} = \frac{\left(\frac{X_{\text{Е}}}{\sigma_{\xi}}\right)_{\text{вих}}}{\left(\frac{X_{\text{Е}}}{\sigma_{\xi}}\right)_{\text{вих АМ}}}$$

або

$$R_{\text{м}} = \frac{\left(\frac{P_x}{P_\xi}\right)_{\text{вих}}}{\left(\frac{P_x}{P_\xi}\right)_{\text{вих АМ}}}$$

де $\left(\frac{X_E}{\sigma_\xi}\right)_{\text{вих}}$ і $\left(\frac{P_x}{P_\xi}\right)_{\text{вих}}$ – відношення ефективного значення сигналу до середньоквадратичного значення завади і відношення середньої потужності сигналу до середньої потужності завади на виході приймального пристрою при довільному вигляді модуляції; $\left(\frac{X_E}{\sigma_\xi}\right)_{\text{вих AM}}$ та $\left(\frac{P_x}{P_\xi}\right)_{\text{вих AM}}$ – аналогічні відношення на виході приймального пристрою при амплітудній модуляції.

Контрольні запитання та вправи

1. З яких складових параметрів зазвичай складається багатопараметричний критерій ефективності?
2. При побудові багатопараметричного критерію ефективності слід прагнути до збільшення кількості використовуваних параметрів або ж їх кількість слід обмежувати і чому?
3. На які групи можна поділити некеровані параметри ІС?
4. Вкажіть основні невизначені фактори, що впливають на ефективність ІС.
5. Якими ймовірностями прийнято характеризувати АСК?
6. З яких складових утворюється функціонально-статистичний критерій ефективності АСКК?
7. Сформулюйте алгоритм оцінювання ефективності АСКК з використанням узагальненого інформаційно-вартісного критерію ефективності.
8. Які критерії ефективності використовуються при оцінюванні завадозахищеності ІС?

4 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИБОРІВ

4.1 Узагальнена математична модель ефективності інформаційних пристроїв

Ефективність інформаційного пристрою характеризує його здатність забезпечувати задану кількість інформації з мінімальними затратами часу, смуги частот, енергії і т. п.

Кількісно ефективність інформаційного пристрою можна оцінити коефіцієнтом ефективності

$$K_e = \frac{\text{максимум ефекту}}{\text{мінімум затрат}}$$

Основним параметром оцінювання ефективності роботи інформаційного пристрою виступає кількість забезпечуваної ними інформації I . Безліч інших параметрів і їх важливість визначаються залежно від виду і призначення П.

Інформаційні пристрої відповідно до техніко-економічних вимог поділяються на три основні групи: військові; промислові; побутові. Також їх можна поділити на реальні та потенційні. Потенційний інформаційний пристрій визначається як ідеальний, який забезпечує отримання максимально можливої кількості інформації при мінімумі витрат. Найжорсткіші вимоги висуваються до пристроїв першої та другої групи для яких характерні такі основні показники: надійність, швидкість обробки інформації, маса, габаритні розміри, споживана енергія, ефективність виробництва та експлуатації, ціна.

Для інформаційних пристроїв цих груп витрати прийнято оцінювати узагальноною вартістю C виробництва і експлуатації пристрою. У цьому випадку ефективність пристрою визначається коефіцієнтом [8]

$$K_{ep1} = I/C. \quad (4.1)$$

Використовуючи коефіцієнт ефективності потенційного пристрою у вигляді

$$K_{ep1} = I_{\max}/C_{\min}, \quad (4.2)$$

після ділення (4.1) на (4.2) отримуємо узагальнений критерій ефективності

$$E = K_{ep1}/K_{ep1} = I \cdot C_{\min}/C \cdot I_{\max}. \quad (4.3)$$

Відношення $I/I_{\max} = \eta_I$ відповідає інформаційному ККД процесу

отримання інформації, а відношення $C_{\min} / C = \eta_c$ – економічному ККД. У цьому випадку (4.3) запишемо як $E = \eta_I \cdot \eta_c$ [10]. При оцінюванні ефективності ІІ можна розглядати як максимальний ефект величину I/C , а як мінімум витрат – витрати енергії ε джерела живлення і сигналу для одержання потрібної кількості інформації (виключивши їх з узагальненої вартості C). Тоді ефективність реального ІІ буде характеризуватися коефіцієнтом $K_{ep2} = I/C \cdot \varepsilon$.

Видимо аналогічне співвідношення для коефіцієнта ефективності потенційного ІІ у вигляді $K_{ep2} = I_{\max}/C_{\min} \cdot \varepsilon_{\min}$. З урахуванням відношення K_{ep2}/K_{ep2} маємо узагальнений критерій ефективності ІІ

$$E = I \cdot C_{\min} \cdot \varepsilon_{\min} / I_{\max} \cdot C \cdot \varepsilon. \quad (4.4)$$

Позначимо $\varepsilon_{\min}/\varepsilon = \eta_\varepsilon$ як повний енергетичний ККД процесу отримання інформації. Тоді (4.4) подамо таким чином:

$$E = \eta_I \cdot \eta_c \cdot \eta_\varepsilon.$$

У загальному випадку, розглядаючи величину $I / \sum_{i=2}^{n-1} b_i$ як максимум ефекту, а b_n -й параметр ІІ як величину, що характеризує мінімум витрат, коефіцієнт ефективності реального ІІ визначимо виразом

$$K_{ep} = I / b_n \cdot \prod_{i=2}^{n-1} b_i. \quad (4.5)$$

Відповідний коефіцієнт ефективності потенційного ІІ запишемо у формі

$$K_{ep} = I_{\max} / b_{n_{\min}} \cdot \prod_{i=2}^{n-1} b_{i_{\min}}. \quad (4.6)$$

Після ділення (4.5) на (4.6) знаходимо

$$E = \frac{I \cdot b_{n_{\min}} \cdot \prod_{i=2}^{n-1} b_{i_{\min}}}{I_{\max} \cdot b_n \cdot \prod_{i=2}^{n-1} b_i}. \quad (4.7)$$

Позначаючи $b_{i_{\min}}/b_i$ як ККД процесу отримання інформації за параметром b_i , (4.7) приймає вигляд

$$E = \eta_i \cdot \prod_{i=1}^n \eta_i, \text{ або } E = \prod_{i=1}^n \eta_i. \quad (4.8)$$

У розглянутому критерії, якщо правильно розраховано параметри $b_{i_{\min}}$ потенційного ПІ, виконуються нерівності

$$b_i \geq b_{i_{\min}}, \quad 0 \leq \eta_i \leq 1, \quad 0 \leq E \leq 1.$$

З урахуванням цих нерівностей з (4.8) видно, що $E < \eta_{i_{\min}}$, тобто спостерігається пріоритетний вплив мінімального параметра b_i на критерій ефективності системи. Крім того, збільшення кількості врахованих параметрів n , що мають $\eta_i < 1$, обов'язково приводить до зниження критерію ефективності E (хоча сама ефективність ПІ при цьому залишається незмінною). Для зменшення впливу мінімального значення η_i та кількості врахованих параметрів n визначасмо узагальнений критерій ефективності як середнє геометричне значення інформаційного ККД і ККД отримання інформації за параметрами b_i .

$$E = \left(\prod_{i=1}^n \eta_i \right)^{1/n}.$$

При проектуванні ПІ (залежно від розв'язуваних ними завдань) не тільки вибираються (або задаються) кількість і найменування параметрів, які необхідно врахувати, але й визначається їх пріоритет (вага) над іншими параметрами. З цією метою у формулу для критерію ефективності введено параметр a_i , що змінює ККД отримання інформації η_i за параметром b_i , і отримано остаточний вигляд узагальненого критерію ефективності ПІ:

$$E = \left(\prod_{i=1}^n \eta_i^{a_i} \right)^{1/n}, \quad (4.9)$$

де $1 \leq a_i \leq \infty$.

Таким чином, для розрахунку ефективності інформаційного пристрою потрібно визначити інформаційний ККД (η_i), ККД отримання інформації за параметром b_i (η_i) і пріоритетні коефіцієнти (a_i). Розрахунок значень η_i пов'язаний із знаходженням параметрів потенційного інформаційного пристрою $b_{i_{\min}}$. У дослідженнях, присвячених аналізу ефективності інформаційних пристроїв і систем, ці параметри детально не розглядаються, хоча від їх значень залежить точність математичної моделі ефективності ПІ.

За потенційний інформаційний пристрій приймається ідеальний при-

стрій, що забезпечує отримання максимально можливої кількості інформації при мінімумі витрат. Він є також ідеальним з точки зору простоти, оскільки в ньому не передбачено резервування (тобто одержання необхідних: швидкодії, обсягу, ваги і т. п., оскільки ці параметри також ідеальні) [1].

Параметри потенційного ПП можуть бути вибрані на основі: аналітичного розрахунку; з урахуванням законів існування матеріального світу; статистичного прогнозу розвитку техніки і її сучасних досягнень. Перший спосіб забезпечує максимальну достовірність результатів і дозволяє встановити зв'язок між різними параметрами ПП.

Застосування другого способу дозволяє врахувати соціальні аспекти розвитку техніки, але у випадку нелінійної зміни параметра b_1 з часом або обмеженої кількості статистичних даних приводить до великої похибки розрахунку.

Менш точний (але простіший) третій спосіб отримання параметра $b_{1п}$ потенційного ПП. Він полягає у виборі параметра $b_{1п}$, який дорівнює максимально (мінімально) досяжному параметру b_1 в цьому вигляді ПП на даний період часу. Однак у такому разі можлива істотна помилка, пов'язана з порушенням закономірностей матеріального світу.

Отже, для визначення параметрів потенційного ПП переважний перший спосіб, а як основні параметри доцільно вибрати: кількість інформації I , одержуваної на виході ПП; узагальнену вартість пристрою C ; кількість енергії ϵ і час t , що витрачаються на отримання необхідної кількості інформації I . Як показав подальший аналіз, введені параметри інтегральні, оскільки вони однозначно визначаються через основні робочі параметри класу ПП, що розглядається.

Відповідно до цих параметрів інформаційний пристрій може бути описано відповідними ККД: інформаційним $\eta_{1п}$, економічним η_c , повним енергетичним η_e та динамічним η_t .

4.1.1 Інформаційний ККД

У роботах Бріллоена було доведено, що "... інформація може бути отримана лише в результаті витрат енергії ..." [16]. Таким чином, Бріллоен ввів поняття негентропії як фізичної міри визначеності будь-якої вимірюваної величини, яка є скінченною, і визначається або її власною дискретністю, або флуктуацією, обумовленою принциповою дискретністю речовини і енергії. Використовуючи ці поняття, П. В. Новицький отримав аналітичні співвідношення для інформаційної здатності вхідного сигналу і для максимальної кількості інформації, яку може містити в собі такий сигнал. При цьому зчитується тільки термодинамічна похибка $v_{ш}$ об'єкта інформації, яка відноситься до матеріальної суті даного об'єкта [6]

$$N_{ш} = \ln D / 2v_{ш} \sqrt{D}, \quad (4.10)$$

$$I_{\text{ш}} = \lg N_{\text{ш}}, \quad (4.11)$$

де D – діапазон зміни вхідної величини;

$v_{\text{ш}}$ – коефіцієнт, що характеризує вихідну визначеність – негентропію будь-якої фізичної вимірюваної величини при певній температурі, відмінній від абсолютного нуля;

$$v_{\text{ш}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{ш}}/\varepsilon_{\text{вх}}}, \quad (4.12)$$

де $\varepsilon_{\text{ш}}$ – шумова енергія об'єкта інформації;

$\varepsilon_{\text{вх}}$ – енергія, споживана вимірювальним пристроєм від об'єкта інформації.

Відомо [6], якщо вимірювальний пристрій має власну похибку v , то його інформаційна здатність і кількість інформації (N , I), одержуваної на виході пристрою, знаходяться як

$$N = \ln D / 2v\sqrt{D}, \quad I = \lg N. \quad (4.13)$$

Застосовуючи розглянуті положення до ПІ, можна вважати, що інформаційна здатність і кількість інформації на виході будь-якого ідеального ПІ при фіксованому діапазоні зміни інформаційного параметра не можуть перевищувати величин, описуваних (4.10), (4.11), оскільки вони не залежать від властивості пристрою, а визначаються тільки властивостями матеріального об'єкта і їх можна розглядати як параметри потенціального ПІ. У цьому випадку інформаційний ККД процесу отримання інформації

$$\eta_I = I/I_{\text{ш}}. \quad (4.14)$$

Враховуючи, що втрата інформації в ПІ знаходиться як

$$\Delta I = I_{\text{ш}} - I = \lg(v/v_{\text{ш}}) \quad (4.15)$$

(4.14) запишемо у вигляді

$$\eta_I = (I_{\text{ш}} - \Delta I)/I_{\text{ш}} = 1 - \Delta I/I_{\text{ш}}. \quad (4.16)$$

Підставляючи (4.11) і (4.15) в (4.16), визначаємо інформаційний ККД через параметри потенціального і реального ПІ

$$\eta_I = 1 - \lg(v/v_{\text{ш}})/\lg N_{\text{ш}}. \quad (4.17)$$

Якщо в ПІ не втрачається інформація ($\Delta I = 0$), то $v = v_{\text{ш}}$ і $\eta_I = 1$. В реальному пристрої завжди є внутрішня завада у вигляді шуму активних і пасивних компонентів, тимчасової нестабільності параметрів компонентів

тощо. Враховуючи, що захист проти зовнішніх детермінованих завад не викликає ускладнень, розглянемо вплив випадкових завад, основною внутрішньою з яких є флуктуаційна завада, обумовлена шумами активних приладів та дисипативними втратами сигналу в пристрої. Припустимо, що на вхід ІІ надходить сигнал потужністю $P_{\text{вх}}$. Тоді (з урахуванням впливу завад) він перетвориться з відносною середньоквадратичною похибкою

$$v = \sqrt{P_{\text{ш вх}}/P_{\text{вх}}}, \quad (4.18)$$

де $P_{\text{ш вх}}$ – потужність шумів ІІ, приведена до входу.

При цьому частина енергії від джерела інформації, що використовується корисно, визначається у вигляді

$$\varepsilon_{\text{кор}} = \varepsilon_{\text{ш}}/v^2 = P_{\text{ш}} \cdot t_{\text{вх}}/v^2, \quad (4.19)$$

де $t_{\text{вх}}$ – тривалість часу надходження інформації. Відношення $\varepsilon_{\text{кор}}/\varepsilon_{\text{вх}}$ складає

$$\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} = \varepsilon_{\text{кор}}/\varepsilon_{\text{вх}} = P_{\text{ш}}/P_{\text{ш вх}}. \quad (4.20)$$

Враховуючи, що потужність шумів, приведена до входу ІІ, дорівнює

$$P_{\text{ш вх}} = 4KT \cdot F_{\text{ш}} \cdot \Delta f, \quad (4.21)$$

де $F_{\text{ш}}$ і Δf – відповідно коефіцієнт шуму і смуга пропускання ІІ, отримуємо співвідношення для енергетичного ККД перетворення інформації на вході ІІ

$$\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} = P_{\text{ш}}/4KTF_{\text{ш}} \cdot \Delta f. \quad (4.22)$$

Таким чином, зменшуючи коефіцієнт шуму $F_{\text{ш}}$ і смугу пропускання Δf , можна підвищити значення $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}$. З урахуванням (4.22) і (4.18) вираз (4.20) приймає вигляд

$$\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} = (v_{\text{ш}}/v)^2. \quad (4.23)$$

Підставляючи (4.23) в (4.17), знаходимо аналітичну залежність між інформаційним η_I і енергетичним $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}$ ККД процесу перетворення інформації:

$$\eta_I = 1 + 0,5 \lg \eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} / \lg N_{\text{ш}}. \quad (4.24)$$

Спільно розв'язуючи (4.24) і (4.20) (з урахуванням (4.21)) знаходимо інформаційний ККД ІІ, виражений через його параметри:

$$\eta_I = 1 + 0,5 \frac{\lg(P_{\text{ш}} / KTF_{\text{ш}} \cdot \Delta f)}{\lg N_{\text{ш}}}, \quad (4.25)$$

при цьому (4.25) відповідає амплітудно-модульованому (АМ) вхідному сигналу. У разі часової (ЧсМ) або частотної (ЧМ) модуляції вхідного сигналу потенційні параметри ПІ, що розраховуються за (4.10), (4.12), змінюються і знаходяться з таблиці інваріантів. Слід зазначити, що коефіцієнт $N_{\text{ш}}$, який входить до (4.17) та характеризує інформаційну здатність потенційного ПІ, є функцією коефіцієнта D , що визначає діапазон зміни вхідного сигналу. Оптимальне значення цього коефіцієнта, що відповідає максимуму інформаційної здатності сигналу, $N_{\text{шmax}}$, для випадку адитивної похибки і гіперболічного закону розподілу щільності різних значень вхідного сигналу по всьому діапазону його зміни буде $D_{\text{opt}} = e^2 = 7,4$. Іншою важливою величиною, пов'язаною з інформаційною здатністю потенційного ПІ, слугує шумова енергія, що залежить від абсолютної температури. При температурі $T = 293$ К значення цієї енергії дорівнює $\varepsilon_{\text{ш}}(T) = 3,5 \cdot 10^{-20}$ Дж. З урахуванням (4.12), (4.23) інформаційний ККД (4.17) виражається у вигляді

$$\eta_I = 1 + 0,5 \frac{\lg(\varepsilon_{\text{ш}} / \gamma)}{\lg N_{\text{ш}}}. \quad (4.26)$$

Слід підкреслити, що (4.26) враховує динамічні властивості вхідного кола ПІ, що характеризують час $t_{\text{вх}}$ перетворення інформації на його вході (де $\gamma = v^2 \cdot P_{\text{вх}} \cdot t_{\text{вх}}$). Величина $\gamma = \varepsilon_{\text{ш}} / \eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}$ відображає енергетичний поріг чутливості ПІ [6]. Враховуючи, що $\lg N_{\text{ш}} > 1$, для реального ПІ справедливі такі нерівності: $v^2 \cdot P_{\text{вх}} \cdot t_{\text{вх}} > \varepsilon_{\text{ш}}$, $v_1 > 1$.

На рис. 4.1 показано розраховані залежності інформаційного ККД ПІ від логарифмів енергетичного ККД прийому інформації $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}$ (при постійному діапазоні D зміни вхідного сигналу і різних видах модуляції). Лінійність цих залежностей дозволяє використовувати $\lg v_{\varepsilon_{\text{вх}}} = \lg(\varepsilon_{\text{ш}} / \gamma)$ для оптимізації ПІ. З графіка видно, що інформаційні ККД ПІ, призначені для роботи з частотно-модульованим (штрихпунктирні лінії) сигналом, значно перевищують значення ККД пристрою, що працює з часово- (штрихові) і амплітудно-модульованими (суцільні) сигналами, при цьому ця відмінність тим більша, чим менше значення енергетичного ККД.

Таким чином, використовуючи енергетичні концепції отримання інформації, можна пов'язати аналітичною залежністю через інформаційний ККД ПІ його основні параметри: похибку перетворення v_1 , швидкодію прийому інформації $t_{\text{вх}}$, рівень насичення $P_{\text{вхн}}$, коефіцієнт шуму $F_{\text{ш}}$, смугу пропускання Δf , енергетичний ККД прийому інформації $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}$, енергетичний поріг чутливості γ і динамічний діапазон D .

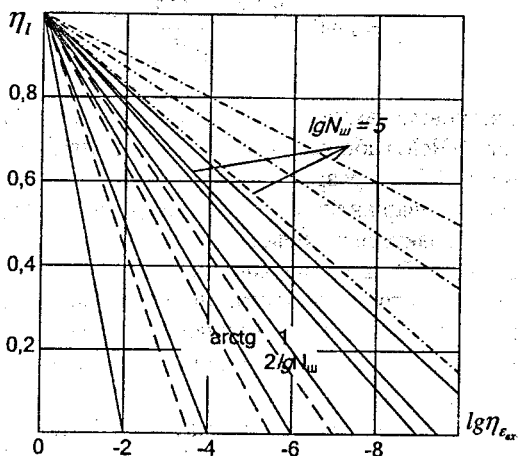


Рисунок 4.1 – Розрахункові залежності інформаційного ККД ПІ η_I від логарифму енергетичного ККД $lg \eta_{\epsilon_{вх}}$ приймання інформації

Крім того, застосування негентропійного принципу інформації Бріллона дозволило встановити зв'язок між інформаційними ККД ПІ, що використовують сигнали з різними видами модуляції, причому граничні інформаційні параметри ПІ скінченні при певній температурі і обмежені значенням шумової енергії $\epsilon_{ш}$.

4.1.2 Енергетичний ККД

При виведенні інформаційного ККД ПІ показано, що його значення залежить від енергетичного ККД прийому інформації $\eta_{\epsilon_{вх}}$. Однак крім втрат енергії на вході існують втрати енергії, пов'язані з трансляцією інформації з входу ПІ на його вихід (так звані втрати трансляції). У пасивних ПІ вони визначаються дисипативними втратами сигналу, а в активних пристроях ще існують втрати енергії джерела живлення $\epsilon_{жив}$. Врахування перерахованих втрат можливе при введенні повного енергетичного ККД η_{ϵ} , рівного відношенню енергії ϵ_n , витраченої на прийом і трансляцію заданої кількості інформації в потенційному пристрої, до аналогічних витрат енергії ϵ_p в реальному пристрої:

$$\eta_{\epsilon} = \epsilon_n / \epsilon_p. \quad (4.27)$$

Враховуючи, що в потенційному пристрої відсутні дисипативні втрати при проходженні сигналу з входу на вихід і його робота не потребує енергії джерела живлення $\epsilon_{жив}$, втрати енергії в ньому пов'язані тільки з втра-

тою при прийомі інформації, тобто

$$\varepsilon_{\Pi} = \varepsilon_{\Pi_{\text{вх}}} - \varepsilon_{\Pi_{\text{вих}}} = \varepsilon_{\Pi_{\text{вх}}} (1 - \eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}). \quad (4.28)$$

Якщо енергетичний ККД ПП $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} = 1$, то $\varepsilon_{\Pi} = 0$ (втрати енергії в потенційному ПП відсутні). Однак відповідно до теорії Бріллоена інформація не може бути отримана без витрати енергії [16]. Отже, в потенційному ПП $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} < 1$, $\varepsilon_{\Pi} > 0$. Енергетичні витрати в потенційному ПП визначаються енергією $\varepsilon_{\Pi_{\text{вх}}}$, що затрачується на його вході при прийманні заданої кількості інформації I_{Π} . Приймаючи для потенційного ПП, що $D = D_{\text{опт}}$, $\varepsilon_{\Pi} = 5,5 \cdot 10^{-20}$ Дж, а також враховуючи (4.13), маємо

$$\varepsilon_{\Pi} = 10^{2(I_{\Pi} - 9,3)}. \quad (4.29)$$

В реальному ПП можуть існувати втрати енергії як від сигналу, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{вх}} - \varepsilon_{\text{вих}}$, так і від джерела живлення $\varepsilon_{\text{жив}}$. Тому сумарна втрата енергії в реальному ПП становитиме

$$\varepsilon_{\text{р}} = \varepsilon_{\text{вх}} - \varepsilon_{\text{вих}} + \varepsilon_{\text{жив}}, \quad (4.30)$$

де $\varepsilon_{\text{вих}}$ – енергія сигналу на виході ПП.

Підставляючи (4.28), (4.28) в (4.17), знаходимо

$$\eta_{\varepsilon} = 10^{2(I_{\Pi} - 9,3)} / (\varepsilon_{\text{вх}} - \varepsilon_{\text{вих}} + \varepsilon_{\text{жив}}). \quad (4.31)$$

Позначимо $\varepsilon_{\text{вх}} / \varepsilon_{\text{жив}} = \eta_{\text{вх}}$, $\varepsilon_{\text{вих}} / \varepsilon_{\text{жив}} = \eta_{\text{вих}}$, де $\eta_{\text{вх}}$, $\eta_{\text{вих}}$ – електронні ККД ПП, і враховуючи, що для сучасних активних ПП $\eta_{\text{вх}} \ll \eta_{\text{вих}}$, (4.31) перетворимо до вигляду

$$\eta_{\varepsilon} = 10^{2(I_{\Pi} - 9,3)} / \varepsilon_{\text{жив}} (1 - \eta_{\text{вих}}). \quad (4.32)$$

Аналіз (4.32) показує, що максимально повний енергетичний ККД мають ПП з малим споживанням енергії від джерела живлення і найбільшим значенням електронного ККД. Враховуючи, що, $\varepsilon_{\Pi} \leq (\varepsilon_{\text{вх}} - \varepsilon_{\text{вих}})$, а отже, $\varepsilon_{\text{р}} > \varepsilon_{\Pi}$ в силу (4.27) маємо $\eta_{\varepsilon} < 1$. Слід підкреслити, що в основі (4.32) знаходиться енергетичний параметр ε_{Π} потенційного ПП, отриманий з тих же інформаційно-енергетичних принципів інформації, що і інформаційний ККД η_I .

4.1.3 Економічний ККД

Інформаційний η_I і повний енергетичний η_{ε} ККД визначають технічну ефективність ПП. Економічну ефективність ПП характеризує економічний ККД $\eta_{\text{е}}$, який знаходиться як відношення узагальнених вартостей потен-

ційного C_n і реального C_p ІІ:

$$\eta_c = C_n / C_p. \quad (4.33)$$

Під узагальненою вартістю маємо на увазі сумарні витрати (виражені в грошових одиницях) на процес отримання на виході ІІ заданої кількості інформації. У загальному випадку вона повинна враховувати як капітальні витрати на проектування, виготовлення та встановлення пристрою в систему, так і поточні витрати на експлуатацію, технічне обслуговування, прибуток, компенсацію збитків через несправність і т. п. Аналіз і розробка методів оцінювання узагальненої вартості різних реальних інформаційних систем, блоків і пристроїв відображені в [1]. Оскільки ІІ за кількістю компонентів і функціональних зв'язків, а також за запропонованими вимогами значно простіші інформаційних систем, розрахунок їх узагальненої вартості C_p не становить особливих труднощів. В наш час відомі інженерні методи її розрахунку з похибкою порядку 10 %. Другою складовою, що характеризує економічний ККД η_c , є узагальнена вартість C_c потенційного ІІ. Виходячи з означення, вважаємо, що для потенційного ІІ капітальні витрати на розробку, виготовлення, установлення пристроїв в систему, витрати на обслуговування дорівнюють нулю. Єдина стаття витрат, яка для потенційного ІІ не може бути прирівняна до нуля, – це витрати, пов'язані з втратою енергії ϵ_n при прийманні заданої кількості інформації. Значення цієї енергії знаходиться з (4.28). Помноживши (4.28) на коефіцієнт питомої вартості енергії C_ϵ , визначасмо узагальнену вартість потенційного ІІ:

$$C_n = C_\epsilon \cdot 10^{2(U_n - 9,3)}. \quad (4.34)$$

Оскільки в реальному ІІ завжди існує втрата енергії на трансляцію сигналу, затрачаються кошти на його виготовлення, профілактику, ремонт і т. п., повинні виконуватися нерівності вигляду $C_n < C_p$, $\eta_c < 1$. Таким чином, (4.34) описує потенційні можливості вдосконалення, експлуатації та технології виготовлення ІІ.

4.1.4 Динамічний ККД

Швидкодія ІІ характеризується його динамічним ККД, рівним відношенню часів одержання потрібної кількості інформації на виході потенційного t_n і реального t_p ІІ:

$$\eta_t = t_n / t_p. \quad (4.35)$$

Час отримання інформації t дорівнює сумі часів перетворення інформації на вході ІІ $t_{вх}$ і трансляції її $t_{тр}$ зі входу на вихід: $t = t_{вх} + t_{тр}$ та визначається потужністю сигналу $P_{вх}$ і енергією $\epsilon_{вх}$, яка повинна надходити

на вхід ПП для отримання заданої кількості інформації ПП. Враховуючи, що реальний і потенційний ПП повинні забезпечувати рівні необхідні кількості інформації, а також вважаючи, що потужність сигналу не може перевищувати потужність насичення реального ПП, знаходимо, що для потенційного ПП $t_{п\text{вх}} = \varepsilon_{п\text{вх}}/P_{\text{вхн}}$ для реального ПП $t_{р\text{вх}} = \varepsilon_{п\text{вх}}/P_{\text{вхн}}$. У потенційних ПП відсутня втрата часу на трансляцію сигналу, а в реальному ПП вона дорівнює крутизні фазочастотної характеристики $t_{\text{тр}} = d\varphi/d\omega$ (φ – аргумент коефіцієнта передачі ПП).

З урахуванням (4.35) і проведеного аналізу визначаємо динамічний ККД ПП

$$\eta_t = \frac{\varepsilon_{п\text{вх}} \cdot \eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}}{\varepsilon_{п\text{вх}} + P_{\text{вхн}} \eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} (d\varphi/d\omega)} \quad (4.36)$$

Як видно з (4.36), динамічний ККД збільшується пропорційно енергетичному ККД $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}$ прийому інформації. Отже, при інших рівних умовах більшу швидкодію мають ПП, призначені для роботи з ЧМ-сигналом, причому для реального ПП $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} < 1$, $t_{\text{тр}} \neq 0$, $\eta_t < 1$.

Таким чином, використовуючи для характеристики ПП його основні параметри I , C , ε , t , що мають жорстке аналітичне визначення як для реального, так і для потенційного ПП, маємо $\eta_I < 1$, $\eta_\varepsilon < 1$, $\eta_t < 1$, $\eta_C < 1$ і $E < 1$. Отримання значень $E \geq 1$ вказує на хибний характер виконаних розрахунків.

4.1.5 Шляхи підвищення ефективності інформаційних пристроїв

Розглянута математична модель дозволяє оцінити ефективність реальних ПП. Наприклад, застосовуючи усереднені параметри сучасних ПП на основі негatronів (а також аналітичні співвідношення (4.24), (4.33), (4.36)), для ККД отримання інформації (4.9) визначимо ефективність ПП, виготовлених з урахуванням різних фізичних ефектів. У розрахунках прийнято $f = 1$ ГГц, $\Delta F = 1$ МГц, $C_\varepsilon = 0,28 \cdot 10^{-9}$ грн./Дж. Найбільшу ефективність мають ПП, що базуються на інжекційно-пролітному ($E = 10^{-10}$) і пролітному ($E = 10^{-11}$) ефектах (табл. 4.1). Близькі до них значення ефективності мають ПП на основі тунельного ефекту. Найгіршу ефективність (на 2–4 порядки) мають ПП, що використовують лавинно-пролітний ефект і ефект Ганна.

Як показали результати розрахунків, визначальним параметром, що впливає на ефективність ПП, є ККД прийому інформації $\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}}$, який максимальний (10^{-6}) для ПП, що базуються на тунельному, інжекційно-пролітному і пролітному ефектах. Значне зниження ефективності ПП на основі лавинно-пролітного ефекту й ефекту Ганна отримано в результаті низьких значень ККД прийому інформації ($\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} = 10^{-7} - 10^{-8}$) і повного енергетичного ККД ($\eta_{\varepsilon_{\text{вх}}} = 10^{-16}$), обумовленого великим споживанням

енергії джерела живлення.

Привертає увагу той факт, що сучасні ІП мають високі значення інформаційного ККД (0,1–0,3 для АМ-сигналу і 0,6–0,8 для ЧМ-сигналу) і значно менші значення ККД отримання інформації за іншими параметрами, причому особливо низькі значення економічного ККД ($\eta_c = 10^{-23} - 10^{-26}$) і повного енергетичного ККД ($\eta_e = 10^{-12} - 10^{-16}$). Малі значення економічного ККД зумовлені насамперед великою собівартістю і низькою надійністю пристроїв. У процесі розрахунків враховувалася вартість реального ІП, виготовленого у вигляді гібридної мікросхеми.

Таблиця 4.1 – Оцінювання ефективності інформаційних пристроїв на основі різних фізичних ефектів

Фізичний ефект в ІП	$\eta_{\text{вх}}$	η	η_e	η_c	η_t	E
Тунельний	10^{-6}	0,09	10^{-13}	10^{-26}	10^{-5}	10^{-12}
Ганна	10^{-7}	0,13	10^{-16}	10^{-25}	10^{-6}	10^{-14}
Лавинно-пролітний	10^{-8}	0,20	10^{-16}	10^{-23}	10^{-8}	10^{-14}
Інжекційно-пролітний	10^{-6}	0,25	10^{-12}	10^{-23}	10^{-5}	10^{-10}
Пролітний	10^{-6}	0,25	10^{-13}	10^{-24}	10^{-5}	10^{-11}

Отже, підвищення економічного ККД досягається за рахунок використання фізичних ефектів і розробки ІП, що забезпечують їх реалізацію у вигляді напівпровідникових мікросхем. Оскільки інформаційна здатність сигналу збільшується з підвищенням частоти, найперспективнішими є ІП, придатні для реалізації у вигляді напівпровідникової мікросхеми НВЧ-діапазону. З урахуванням найближчих перспектив розвитку технологічної бази цим вимогам відповідають ІП, які застосовують напівпровідникові структури із затвором Шотткі і базуються на пролітному ефекті та ефекті Ганна. Значні потенційні можливості підвищення ефективності ІП укладені також в збільшенні повного енергетичного ККД, наприклад, за рахунок створення ІП, що працюють в мікрорежимі або використовують нові фізичні ефекти (пролітний, ефект Джозефсона і т. п.), а також досягнення нанонегатроніки.

4.2 Оцінювання ефективності перетворювачів інформації

Широке використання засобів цифрової обчислювальної техніки, в тому числі і мікропроцесорів, при створенні різного роду автоматизованих і

автоматичних систем для вимірювання і керування, зумовлює важливість проблем організації зв'язку цифрових пристроїв з реальними об'єктами. Для успішного вирішення цих проблем необхідні аналого-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі інформації (ПІ), що мають високі метрологічні і експлуатаційні параметри.

4.2.1 Основні задачі системного оцінювання ефективності перетворювачів інформації

В теорії і техніці перетворювання інформації використовують різні характеристики точності, швидкодії, надійності і вартості, кожна із яких може розглядатися як частковий показник ефективності ПІ. Спроби вибору кращого варіанта ПІ одночасно за декількома частковими показниками зазвичай позбавлені сенсу, оскільки на практиці покращення одного параметру не рідко супроводжується погіршенням по крайній мірі одного іншого параметру. Тому доцільним є використання інтегральних критеріїв ефективності, які пов'язують в необхідних пропорціях основні, найважливіші показники. Однак і в цьому випадку необхідно ретельно підходити до оцінювання ефективності ПІ, інакше можна отримати неправильні результати. Розглянемо це на двох прикладах, що наведені в [4].

Приклад 1. В інженерній практиці точність АЦП нерідко однозначно пов'язують з кількістю розрядів вихідного коду. По суті це означає урахування тільки методичної похибки, властивої процесу аналого-цифрових перетворень. В результаті, вибираючи АЦП з максимальною розрядністю, проєктант досягає інколи лише подорожання системи (за рахунок збільшення розрядної сітки ЕОМ, необхідного обсягу пам'яті і т. п.), але не підвищення її точності.

Наведемо порівняльний аналіз перетворювачів «вал-код»: фотоелектричного і магнітного. Ці перетворювачі мають однакові робочі діапазони – (0–360°) із розрядністю вихідного коду $N_m = N_\phi = 13$, але різні середньоквадратичні значення інструментального шуму (0,154° і 2,200°, відповідно). Вважаючи, що обидва АЦП можуть забезпечити необхідну швидкодію і час безперервної безвідмовної роботи, оцінимо, який вииграш дає вибір фотоелектричного перетворювача замість магнітного.

На рис. 4.2 подано графіки, що характеризують відносний вииграш u в сумарній кількості інформації, одержуваної цифровою системою від АЦП при такій заміні. З графіка видно, що незважаючи на однакову розрядність і швидкодію АЦП, що розглядаються, абсолютно нерівнозначні: фотоелектричний перетворювач видасть в цифрову підсистему на 20 % більше інформації, ніж магнітний. Більш того, вибір фотоелектричного перетворювача виявляється кращим навіть у тому випадку, коли використовуються не всі 13 його розрядів, а тільки 12. Обидва перетворювачі видадуть практично однакову сумарну кількість інформації, якщо фотоелектричний ПІ буде мати на два розряди менше, ніж магнітний.

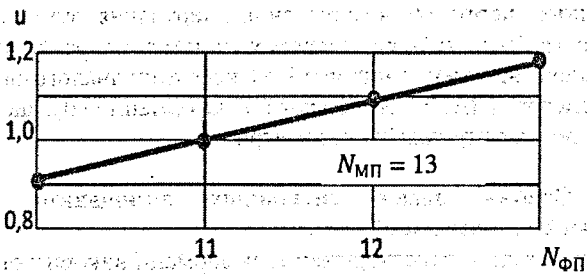


Рисунок 4.2 – Залежність «виграшу» фотоелектричного перетворювача (ФП) порівняно з магнітним (МП) залежно від розрядності АЦП

Приклад 2. Для оцінювання точності ПІ широко використовують різні метрологічні показники, такі як абсолютно допустима похибка, чутливість, приведена похибка і т.п. Перевагами цих показників є відносна простота і наочність. Однак вони визначаються без урахування реальних ймовірнісних властивостей перетвореного сигналу. Між тим таке урахування може привести до абсолютно несподіваних результатів.

Порівнюючи за основною приведеною похибкою γ і чутливістю Δ цифрові вольтметри (значення γ складає в цих вольтметрів 0,05 % і $(0,15x/X_{\text{max}}+0,01)$ %, а значення Δ дорівнюють 100 мкВ і 1000 мкВ, відповідно), можна прийти до висновку, що перший вольтметр має істотно високу якість. Зокрема чутливість цього вольтметра на порядок вища. Однак при урахуванні реальних функцій щільності ймовірностей вимірюваних сигналів виявляється, що цей результат не завжди правильний. Якщо вимірюваний сигнал розподілений за експоненціальним законом (рис. 4.3, а), то другий вольтметр може виявитись кращим першого. Дійсно, в цьому випадку найбільшу щільність ймовірностей мають значення сигналу, що знаходяться в тій області робочого діапазону, де допускається абсолютна похибка $\pm \Delta = \gamma X_{\text{max}}$ у другого вольтметра менша (рис. 4.3, б). Аналогічний результат може бути і при інших розподілах сигналу (наприклад, при нормальному розподілу, що подано на рис. 4.3, а пунктирною лінією).

Для характеристики ефективності ПІ використовуються різні інформаційні критерії, які поділяються на дві групи: інформаційні критерії (ентропія, швидкість передачі інформації, пропускна здатність), розроблені К. Шенноном та критерії, що враховують ентропійну похибку, інформаційну здатність [6], еквівалентну кількість поділок [17].

Підставою для використання інформаційних критеріїв в теорії та техніці перетворення інформації стало важливе положення шеннонівської теорії, яке полягає в тому, що з інформацією можна поводитися таким же чином, як і з такими фізичними величинами, як маса і енергія.

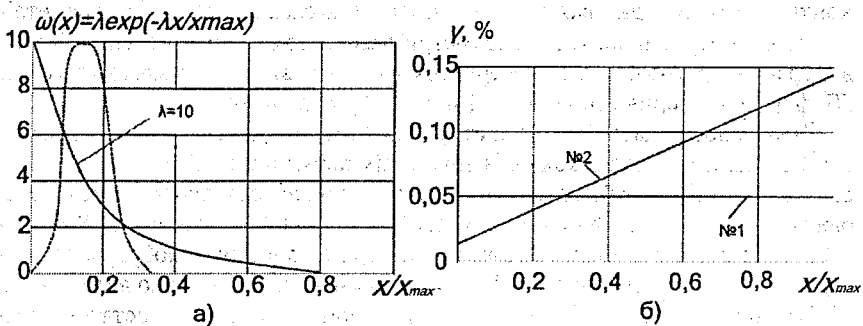


Рисунок 4.3 – Порівняльні характеристики 2-х цифрових вольтметрів

Швидкість передачі інформації та пропускна здатність, що входять в першу групу критеріїв, для оцінювання ефективності ПІ непридатні. Загальний недолік критеріїв другої групи полягає в тому, що всі вони характеризують ефективність ПІ в статичі і не можуть застосовуватися в тих випадках, коли перетворювані сигнали не є випадковими величинами, а являють собою реалізацію випадкових процесів. Лише при інформаційному підході до оцінювання точності ПІ вдається побудувати узагальнені критерії їх ефективності, що враховують одночасно з точністю, надійність і вартість перетворювачів. Використання таких узагальнених критеріїв дозволяє оцінювати якість ПІ не за сукупністю власних показників, а за одним показником і характеризувати якість ПІ одним числом. Найбільш поширеними узагальненими критеріями є критерії вигляду (2.1).

Недоліком такого критерію є можливість компенсувати технічні недосконалості зменшенням витрат. Однак при системному підході до проектування на ефект і витрати накладаються певні обмеження. Якщо при цьому критерій (2.1) має ясний фізичний зміст, що характеризує цілі проектування (оптимізації), то компенсація зниження ефекту за рахунок зменшення витрат в допустимих межах може вважатися цілком виправданою.

Важлива особливість узагальнених критеріїв полягає в тому, що вони характеризують ефективність ПІ не як самостійного технічного пристрою, а як складову частину гібридної системи в цілому. Це досягається за рахунок використання в неявному вигляді вагових коефіцієнтів для окремих показників ПІ.

4.2.2 Алгоритм синтезу комплексних критеріїв ефективності перетворювачів інформації

В роботі [4] запропоновано алгоритм синтезу комплексного критерію ефективності ПІ, який слід розглядати як частковий випадок синтезу таких критеріїв ефективності.

Комплексний критерій ефективності повинен пов'язувати в потрібних пропорціях найважливіші параметри перетворення інформації. В кожному

конкретному випадку важливість одних і тих самих зовнішніх параметрів ПІ може бути різною. Одні параметри мають домінуючі значення, інші – відіграють другорядну роль. Через різноманіття вимог, що висуваються до ПІ, форми критеріїв ефективності можуть бути різними.

Властивості наочності, конструктивності та універсальності можуть бути забезпечені, якщо кожен із зовнішніх параметрів ПІ входить в критерій ефективності в явному вигляді. Однак з точки зору простоти критерію, бажано щоб у ньому фігурувала мінімальна кількість параметрів. Крім того, при великій кількості враховуваних параметрів важко побудувати критерії, які мають ясний фізичний зміст. У зв'язку з цим доцільно виявити той мінімальний набір зовнішніх параметрів, який необхідно і достатньо враховувати при побудові критеріїв ефективності ПІ. При вирішенні цього завдання слід розрізняти функціональні і вартісні зовнішні параметри.

Одним з найважливіших зовнішніх параметрів ПІ є точність. Вона відноситься до домінуючих параметрів. При цьому в загальному випадку точність являє собою векторний параметр, що визначається статистичними динамічними складовими результуючої похибки.

Якщо точність є домінуючим параметром, то швидкодія зазвичай вже не відіграє домінуючої ролі. Це пояснюється тим, що швидкодія при заданому вхідному сигналі ПІ однозначно пов'язана з динамічними похибками, які враховуються при оцінюванні точності. Тому швидкодія може бути домінуючим зовнішнім параметром ПІ в тому випадку, коли точність не відіграє домінуючої ролі.

Підвищення точності ПІ зазвичай пов'язане з необхідністю додаткових апаратурних витрат. А це приводить до зниження надійності ПІ відносно катастрофічних відмов. Таким чином, висока точність перетворювача не є гарантією високої надійності і, навпаки, з високої надійності не слід чекати високої точності. Звідси випливає можливість таких ситуацій при проектуванні ПІ, коли потрібно забезпечити найбільш вдале поєднання точності та надійності (а не максимальну точність або максимальну надійність). По суті це означає, що і точність, і надійність можуть бути домінуючими параметрами і входити в явному вигляді в критерій ефективності ПІ.

У сукупність варіантів ПІ, порівнюваних за критерієм ефективності на етапі внутрішнього проектування, входять тільки ті варіанти, які задовольняють запропоновані вимоги щодо гранично допустимих характеристик вхідного сигналу і умов нормального функціонування ПІ не є домінуючими параметрами і критерії ефективності можуть будуватися без їх урахування. Це не означає, однак, що критерій ефективності не повинен враховувати реальні характеристики сигналу та інших зовнішніх факторів.

Серед ПІ, порівнюваних за критерієм ефективності, не може бути кращого або гіршого варіанта щодо форм подання вхідної і вихідної інформації, а також інших якісних параметрів. Порівнюватись можуть тільки ті перетворювачі, які забезпечують перетворення сигналів заданої фізичної природи (напруги постійного струму, кутового переміщення, двійкового

паралельного коду і т. п.) і виробляють на виході сигнали необхідного вигляду (паралельний двійковий код, напруга постійного струму і т. п.). Це означає, що якісні параметри також не є домінуючими, і, отже, можуть не входити в критерії ефективності ПІ.

З параметрів вартісної групи в кожному конкретному випадку зазвичай достатньо розглядати як домінуючий тільки один параметр. Наприклад, для ПІ, що використовуються в бортових системах, таким параметром може бути маса. В деяких випадках домінуючу роль відіграє розрядність вихідного коду АЦП. Зменшення розрядності вихідного коду може мати важливе значення для зменшення вартості гібридної системи в цілому (наприклад, за рахунок зниження вимог до пропускної здатності каналів передачі інформації від АЦП, скорочення обсягу запам'ятовувального пристрою для зберігання результатів перетворення і т. п.). Слід зазначити також, що ПІ, які характеризуються кращим значенням одного вартісного параметра (наприклад, розрядності вихідного або вхідного коду), нерідко мають кращі показники і за іншими вартісними параметрами (наприклад, меншу кількість інтегральних схем, меншу масу тощо).

Таким чином, при побудові критеріїв ефективності, що мають властивості конкретності, конструктивності, простоти і універсальності, достатньо враховувати тільки такі параметри: точність або швидкодію, надійність (щодо катастрофічних відмов) і один із вартісних параметрів.

Розглянемо передумови, що дозволяють забезпечити чутливості критеріїв до умов функціонування ПІ в кожній конкретній системі. При системному підході до проектування перетворювача, забезпечення його високої ефективності за тими чи іншими параметрами не є самоціллю. Проектування ПІ являє собою один з етапів проектування системи в цілому. При цьому завдання полягає у створенні такого ПІ, використання якого в даній системі більш доречно, ніж будь-якого іншого можливого варіанта перетворювача. Отже, критерій ефективності слід побудувати таким чином, щоб він дозволяв враховувати вплив основних параметрів ПІ (точності, надійності і вартості) на ефективність всієї системи. На жаль, встановити зв'язок між точністю ПІ і системи в загальному випадку досить складно. Тому вважають, що підвищення точності ПІ приводить до підвищення точності системи (без кількісного оцінювання цього ефекту), і в критерії враховувати тільки точність перетворювача.

Взаємозв'язок між надійністю і вартістю ПІ, з одного боку, і системи, з іншого боку, можна визначити, виходячи з таких міркувань. При проектуванні системи формулюються вимоги щодо надійності і вартості для всіх блоків, що утворюють систему. Отже, можна розрахувати надійність і вартість системи без урахування ПІ. Наприклад, нехай середня інтенсивність відмов системи без урахування ПІ дорівнює λ_0 , а вартість – C_0 . Припустимо далі, що для ПІ відповідні параметри дорівнюють $\lambda_{ПІ}$, год⁻¹ і $C_{ПІ}$. Тоді середній час безвідмовної роботи τ та вартість C системи з даним варіантом перетворювача будуть дорівнювати: $\tau = 3600/(\lambda_0 + \lambda_{ПІ})$; $C = C_0 + C_{ПІ}$.

Якщо надійність і вартість є домінуючими параметрами, то оптимізацію ПІ слід виконувати з урахуванням параметрів τ і C , а не $\tau_{\text{ПІ}} = 3600 / \lambda_{\text{ПІ}}$ і $C_{\text{ПІ}}$. У цьому випадку автоматично враховується вага відповідного параметра в критерії ефективності. Наприклад, при $C_{\text{ПІ}} \ll C$ вартість перетворювача буде входити в критерій з невеликою вагою. Якщо $C_{\text{ПІ}} \approx C$, то вага даного параметра буде великою.

Розглянемо методику оцінювання точності ПІ. Цей параметр характеризується результуючою похибкою, яка в загальному випадку залежить від властивостей перетвореного сигналу і зовнішніх коливань (варіацій температури навколишнього середовища, барометричного тиску, тощо). При системному підході до проектування ПІ критерій ефективності повинен враховувати цю залежність і приймати різні числові значення при різних характеристиках сигналу і зовнішніх коливань.

Результуюча похибка в даному випадку може розглядатися як вихідний сигнал $Z(t)$ деякої багатовимірної нелінійної динамічної системи, вхідними сигналами якої є перетворений сигнал $X(t)$ і зовнішні впливи заводів $M_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Оскільки вхідні сигнали можуть бути нестационарними випадковими процесами та ПІ в строгому сенсі також є нестационарною складовою системи, то і похибка в загальному випадку також являє собою нестационарний випадковий процес.

Для характеристики похибки АЦП використовують різні функціонали, які відображають тільки окремі властивості похибки, що найбільш цікаві у даній конкретній ситуації. До таких функціоналів відносяться, зокрема, модуль максимуму похибки, модулі максимальних відносної та приведеної похибки, довірчі інтервали й середній модуль похибок, середній модуль відносної та приведеної похибок.

Всі ці функціонали тією чи іншою мірою чутливі до характеристик перетвореного сигналу і зовнішніх впливів заводів. Їх застосування не викликає принципових заперечень, якщо домінуючим є тільки один параметр ПІ – точність. Однак при побудові комплексних критеріїв ефективності, що пов'язують в обґрунтованих пропорціях точність, оцінювану будь-яким з вищевказаних функціоналів; надійність і (або) вартість ПІ, виникають певні труднощі.

Можливість побудови критеріїв ефективності, що враховують одночасно із точністю інші домінуючі параметри і мають чіткий зміст, з'являється при використанні для оцінювання точності ПІ інформаційних характеристик. Такою характеристикою можуть слугувати різні оцінки інформаційної продуктивності.

На підставі розглянутих вище міркувань про шляхи задоволення основних вимог до критеріїв ефективності ПІ в [4] запропоновано алгоритм синтезу критеріїв такого вигляду:

$$Q = \frac{\bar{R}^{q_R} \left(\frac{3600}{(\lambda_0 + \lambda_{\text{ПИ}})} \right)^{q_H} B^{q_H} V^{q_V} \chi^{q_T}}{\prod_i ((C_0)_i + (C_{\text{ПИ}})_i)^{q_i}}$$

де \bar{R} – оцінка інформаційної продуктивності (біт/с), яка характеризує кількість інформації в перетворюваному сигналі, передану через ПІ в одиницю часу;

B – швидкодія перетворювача (кількість перетворень в секунду);

χ – неінформаційна характеристика точності;

C_i – вартісні параметри;

q_R, q_B, q_H, q_i, q_T – логічні змінні, які приймають значення 1, якщо відповідний параметр є домінуючим, і значення 0 – в протилежному випадку. Змінні q_R, q_B, q_H, q_i, q_T повинні відповідати таким співвідношенням:

$$q_R \wedge q_T = 0; \quad q_R \wedge q_B = 0; \quad q_i \wedge q_j = 0, \quad (i \neq j),$$

$$q_T \wedge q_H \wedge q_B \wedge q_i = 0,$$

де \wedge – символ логічної операції кон'юнкції.

4.3 Критеріальне оцінювання ефективності вимірювальних засобів

При побудові системи показників ефективності засобів вимірювань, найскладнішим є визначення поняття обсягу можливостей того чи іншого пристрою і вибір шкали числових значень й одиниці для його вимірювання. Якщо обмежуватися встановленням поняттям обсягу можливостей пристрою в нормальних умовах експлуатації (тобто за відсутності великих механічних, кліматичних та інших впливів), то можна стверджувати, що цей обсяг насамперед залежить від основних нормованих параметрів, тобто від межі вимірювання (чутливості) пристрою, його вхідного опору, швидкодії та похибки. Дійсно, погіршити чутливість пристрою в більшості випадків незрівнянно простіше, ніж її підвищити. Тому більш чутливий пристрій має більший обсяг можливостей, ніж пристрій з малою чутливістю. Можливості пристрою з великим вхідним опором більші, ніж у пристрої з малим вхідним опором, оскільки перший може використовуватись для вимірювання як потужних, так і малопотужних об'єктів, в той час як інший – тільки при вимірюванні потужних об'єктів. Швидкодіючий пристрій забезпечує можливість вимірювання як швидких, так і повільних процесів, і відповідно має більший обсяг можливостей, ніж повільно діючий. І нарешті, точніший пристрій дозволяє проводити як точні, так і грубіші вимірювання, тобто має більший обсяг можливостей, ніж менш точний пристрій.

Однак математичний вираз для опису понять обсягу можливостей, що досягається в пристрої, не може бути знайдено в загальному вигляді відно-

сно будь-яких вимірювальних засобів. В основі таких пошуків лежить вивчення фактичних взаємозв'язків між витратами і обсягом можливостей, що досягається, для ряду різновидів вимірювальних засобів, виконуваних подібним чином, і які характеризуються одним і тим самим набором нормованих показників (наприклад, магнітоелектричні пристрої постійного струму і окремо – випрямні пристрої; електронні вольтметри постійного струму і окремо – змінного; електронні вимірювальні генератори та окремо – стабілізатори і т. п.).

При цьому вигляд математичного виразу обсягу можливостей для кожного з вузлів вимірювального пристрою в функції від значень основних нормованих його параметрів повинен з одного боку, відображати фактичну складність досягнення тих чи інших значень цих параметрів, характерну для сучасного світового стану приладобудування, але, з іншого боку, бути єдиним для всього діапазону зміни цих параметрів, що зустрічаються в реально існуючих вузлах цього типу.

Метод підсумовування окремих параметрів з ваговими коефіцієнтами відносно вимірювальних засобів є безперспективним. Справа в тому, що окремі параметри вимірювальних пристроїв змінюються в дуже широкому діапазоні (швидкодія в 10^6 раз, вхідні опори в 10^9 раз і т. д.). Однак, аналізуючи фактичну складність досягнення тих чи інших значень власних параметрів, можна встановити їх взаємні зв'язки. Так, наприклад відомо, що змінюючи глибину зворотного зв'язку в підсилювачі при незмінній його схемі і кількості деталей, можна в широких межах змінити його похибку і чутливість, однак відношення значень чутливості і похибки залишиться при цьому незмінним. Тому, наприклад, десятикратне пониження похибки пристрою, що містить будь-який підсилювач, за рахунок такого ж пониження його чутливості не потребує від проектувальника ніякого підвищення затрат деталей і не може розглядатись як підвищення або пониження об'єму можливостей пристрою. Звідси, в загальний вираз для обсягу можливостей пристрою ці параметри не можуть входити у вигляді суми (з будь-якими ваговими коефіцієнтами), а повинні входити саме у вигляді добутку точності на чутливість або похибки γ на межу вимірювання U чи I .

Виходячи з вищесказаного в [17] показано, що добуток головних нормованих параметрів вимірювальних пристроїв постійного струму вигляду $\gamma^2 I^2 R t \eta = W_{\text{ш}} = 3,5 \cdot 10^{-20}$ Дж є загальним законом взаємозв'язку цих параметрів і визначає їх інформаційно-енергетичний коефіцієнт корисної дії, рівний

$$\eta = \frac{W_{\text{ш}}}{\gamma^2 I^2 R t},$$

де $W_{\text{ш}}$ – шумова енергія;

γ – похибка пристрою;

$I^2 R$ – потужність, споживана від об'єкта вимірювання;

t – час встановлення показів.

Виходячи із цього, запропоновано використовувати значення η для оцінювання обсягу можливостей вимірювальних пристроїв при аналізі їх якості. Поняття інформаційно-енергетичного ККД в подальшому було поширено (з відповідними уточненнями) і на пристрої змінного струму.

Не менш складним питанням є встановлення шкали числових значень обсягу можливостей того чи іншого пристрою. В практиці вимірювань часто використовують декілька однотипних вимірювальних пристроїв для паралельного вимірювання декількох однотипних вимірюваних величин (канали вимірювально-інформаційних систем). В цьому випадку загальні затрати (кількість елементів, вага або вартість) пропорційні кількості використовуваних однотипних пристроїв. Вважається, що питома ефективність будь-якої кількості одночасно використовуваних пристроїв залишалась рівною питомій ефективності кожного із цих пристроїв. Якщо при цьому припустити, що сумарний обсяг можливостей паралельно працюючих пристроїв рівний сумі обсягів можливостей цих пристроїв, то спільне виконання цих вимог можливе тільки в єдиному випадку – при прямій пропорційності шкали числових значень обсягів можливостей і шкали необхідних для цього затрат.

Вимірювальний пристрій чи канал вимірювальної системи складається із ряду окремих вимірювальних перетворювачів. При цьому загальна вартість чи загальна вага пристрою є сумою ваг або вартостей всіх його вузлів. Тому необхідно, щоб загальний обсяг можливостей пристрою також був сумою обсягів можливостей його вузлів. Це досягається при прямій пропорційності шкали числових значень обсягу можливостей кожного із вузлів і шкали необхідних для цього витрат.

Для встановлення шкали числових значень обсягів можливостей різноманітних засобів вимірювань, пропорційній шкалі необхідних для цього витрат, слід припустити сталість середнього необхідного рівня питомих витрат на досягнення одиниці об'єму можливостей для кожного типу засобів вимірювання і з'ясувати це значення як середньостатистичне за всіма засобами вимірювання даного типу. Таке статистичне дослідження і визначить остаточно вигляд математичного відношення між власними показниками, обсягом можливостей і витрат.

В [4] встановлено, що $\lg \eta$ пропорційний логарифму витрат у вигляді кількості елементів електронних приладів, маси або ціни. Ці статистичні залежності досить добре корельовано і в середньому описуються виразами вигляду

$$K = k_1 \sqrt[m]{\eta},$$

де K – капітальні вкладення у вигляді кількості електронних елементів, маси або ціни пристрою;

η – інформаційно-енергетичний ККД;

k_1 і m – сталі, які визначаються з статистики фактичних даних засобів вимірювання конкретної досить вузької групи.

4.4 Критеріальне оцінювання ефективності каналів передавання вимірюваної інформації

При проектуванні розподілених у просторі інформаційно-вимірювальних систем постає задача оптимізації засобів передачі вимірюваної інформації у комплексі із засобами її отримання і обробки.

Оцінювання ефективності таких систем виконується на багатокритеріальному підґрунті. Однак суперечність таких найважливіших характеристик, як достовірність, швидкодія, живучість, коефіцієнт завантаження каналу зв'язку тощо не дозволяє проектувати оптимальні системи з точки зору всього комплексу показників. Використання одного показника як критерію оптимальності при врахуванні решти як обмежень не вирішує проблеми, оскільки саме формулювання обмежень є складною задачею. Узагальненою найчастіше використовуваною технічною характеристикою каналу передачі даних є його пропускну здатність

$$V_q = \bar{I}/T, \quad (4.37)$$

де \bar{I} – середня кількість інформації, що передається за час T , при цьому \bar{I} вимірюється у структурній інформаційній мірі.

Враховуючи широкий діапазон цін на програмно-технічні засоби передачі даних, при проектуванні рекомендується використовувати техніко-економічний показник «вартість кілобита переданої інформації»

$$K_q = C_k/(10^{-3}V_q),$$

де C_k – вартість каналу.

Така характеристика зручна при проектуванні каналів загального призначення, які використовуються головним чином для передачі текстів документів, програм тощо. Однак при передачі вимірюваної інформації оптимізація на основі критерію (4.37) не забезпечує позитивного результату. Значно ефективніше використання у цьому випадку аналогічного критерію, але з оцінюванням кількості інформації у статистичній мірі, тобто

$$K_i = C_n/(10^{-3}V_i),$$

де V_i – інформаційний потік у статистичній мірі.

Для обґрунтування цього висновку професором Дубовим В. М. розглянуто вплив основних характеристик ІВС на критерії K_q і K_i . При оцінюванні інформаційних потоків в ІВС використовується операторний метод моделювання динаміки інформаційних потоків. Інформаційні потоки в ка-

налах зв'язку визначаються протоколами зв'язку. Для оцінювання інформаційних потоків у каналі найважливіші три нижніх рівні протоколів: фізичний, каналний і мережний.

На фізичному рівні виконується оцінювання значення інформаційного потоку при передачі одиночного даного як в аналогових (безперервних), так і в дискретних (цифрових) каналах. Кількість інформації в цьому випадку визначається за відомою теоремою Шеннона:

$$I_y = F_k T \ln \left(1 + \frac{P_{CY}}{P_{ПY}} \right),$$

де F_k – ширина смуги пропускання каналу зв'язку;

T – час передавання інформації;

P_{CY} – потужність корисного сигналу на виході каналу;

$P_{ПY}$ – потужність завад на виході каналу.

З урахуванням коефіцієнта K_Γ готовності підсистем передачі даних, маємо

$$I_y = K_\Gamma F_k T \ln \left(1 + \frac{P_{CY}}{P_{ПY}} \right).$$

Виражаючи потужність сигналу через інформаційний потік, що переноситься ним, на вході системи передачі інформації отримуємо

$$\begin{cases} P_{CY} = \alpha P_{CX}, \\ i_x = F_0 \ln \left(1 + \frac{P_{CX}}{P_{MX}} \right). \end{cases}$$

В результаті

$$i_y = K_\Gamma F_k \ln \left[1 + \frac{\alpha P_{ШХ}}{P_{ПY}} \left(e^{\frac{i_x}{F_0}} - 1 \right) \right],$$

де $P_{ШХ}$ – інформаційна роздільна здатність на вході каналу зв'язку, обумовлена тепловими шумами для аналогового каналу та кроком дискретизації для дискретного каналу;

α – коефіцієнт передачі каналу;

F_0 – смуга частот сигналу;

F_k – смуга пропускання каналу.

Інформаційний потік i_x , що утворюється вимірювальною підсистемою, залежить від співвідношення між статистичними характеристиками контрольованого процесу і метрологічними характеристиками підсистеми сприйняття інформації

$$i_X = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \ln(2k_{EI} D_X) + \int_0^{\Delta t} \ln \left(1 - r_{XX}^2(t) + \left[\frac{k_{E2} \sigma_{Y0} \sum_{i=1}^n C_i}{k_{EI} D_X nK} r_{XX}(t) \right]^2 \right) dt \right\},$$

де $n = E_{nt}[D/V_0]$;

D – область взаємодії чутливого елемента з об'єктом контролю;

V_0 – елементарний об'єм взаємодії;

σ_{Y0} – середнє квадратичне відхилення інформативного сигналу;

Δt – інтервал вимірювання;

C_i – коефіцієнт енергетичної ефективності;

$r_{XX}(t)$ – нормована кореляційна функція;

$K = \frac{\sqrt[3]{V_0}}{\Delta l_{XX}} - 1$ за умови $\frac{\sqrt[3]{V_0}}{\Delta l_{XX}} \geq 2$, $K = 1$ за умови $\frac{\sqrt[3]{V_0}}{\Delta l_{XX}} < 2$;

Δl_{XX} – інтервал просторової кореляції.

Використання протоколів вищих рівнів – каналного і мережного, забезпечує адресацію даних у мережі, захист від збоїв у каналі і від несанкціонованого доступу, узгодження каналних протоколів у багатоланцюгових каналах передачі даних. Розрахункові формули для оцінювання інформаційних потоків при використанні цих протоколів зведені в табл. 4.2.

У таблиці позначено T_D – час передачі блока даних користувача; T_{II} – час передачі протокольних даних; T_3 – час встановлення з'єднання; T_P – час роз'єднання; n – кількість операцій скидання за сеанс зв'язку; T_{CK} – час виконання скидання; τ_D – час перебування даних в каналі; Q_6 – розмір буфера; $T_{CГЛ}$ – час передачі при узгоджених довжинах блоків.

Таблиця 4.2 – Розрахункові формули для оцінювання інформаційних потоків

Фізичний	Канальний		Мережний
	із з'єднанням	без з'єднання	
i_Y	i''_Y	i'_Y	i'''_Y
$f[i_X(\tau)]$	$i_Y \frac{T_D - n\tau_D}{T_3 + T_P + nT_{CK} + T_D}$	$\frac{i_Y^2}{K_{II} + i_Y}$	$\frac{i''_Y T_{CГЛ}}{T_{CГЛ} + \frac{Q_6}{(K_{II} + 1) i''_Y}}$
Q_0	$Q_0 + Q_{II} + nQ_C$	$Q_0 + Q_{II}$	$Q_0 + Q_{II} + Q'_P$
C_0	$C_0 + C_K$		$C_0 + C_K + C_M$

Таким чином,

$$K_i = C_n / (10^{-3} f_n [i_X(\tau, \Delta t)]),$$

де C_n і f_n , згідно з таблицею 4.2, – функції, які залежать від рівня протоколу зв'язку.

У структурному вимірюванні кількість інформації у одному значенні контрольованого параметра Q_0 є сталою, що визначається роздільною здатністю аналого-цифрового перетворення. При використанні, наприклад, 12-розрядного АЦП відповідно $Q_x = 12$ біт. Протокольна інформація збільшує Q на сталу величину, утворюючи пакет розміром Q_y , тобто

$$K_q = \left(\frac{c}{10^{-3} Q_y} \right) \Delta t.$$

Вартість передачі інформації C складається з постійних витрат (заробітна плата персоналу, вартість допоміжного обладнання тощо) і витрат, що пропорційні швидкості передачі інформації (вартість основного обладнання: модемів, адаптерів, кабелів тощо).

При передачі неупакованих даних вимірювань (у реальному масштабі часу) використовувати статистичні критерії оптимізації доцільніше, ніж структурні. Для таких даних навіть використання методів ущільнення не дозволяє повністю усунути статистичну збитковість, яка не може бути врахована структурними критеріями.

4.5 Критеріальне оцінювання ефективності оптоелектронної елементної бази

Параметри сучасних інтегральних мікросхем (ІМС) взаємозв'язані і визначають як рівень інтеграції, так і ширину можливостей їх застосування. Це твердження цілком відноситься і до оптоелектронних елементів і схем. Для комплексного оцінювання схмотехнічного базису ІМС застосовується наряду з параметром «потужність×швидкодія» ($P_{cp} \times t_3$, де P_{cp} – середня споживана потужність; t_3 – середній час затримки, добуток яких для заданої технології виготовлення ІМС залишається сталим, тобто $P_{cp} \times t_3 = \text{const}$) такий параметр, як «час затримки × рівень інтеграції» ($t_3 \times N$). Зазвичай рівень інтеграції характеризують коефіцієнтом K , рівним десятковому логарифму від кількості елементів (тобто $K = \lg N$). Більш об'єктивне оцінювання рівня інтеграції ІМС дає урахування кількості вентилів на кристалі.

Для комплексного оцінювання схмотехнічного базису ІМС використовуються такі критерії якості:

- фактор якості $F_k = P_{cp} \times t_3$;
- швидкодія (кількість переключень в одиницю часу), яка залежить також і від величини t_3 ;
- щільність елементів S_N ;
- функціональну щільність компоновання S'_N ;

– тип застосовуваної технології.

Для всебічного оцінювання базових мікросхем також використовується поняття добротності Q , яке враховує логічну гнучкість базових схем L , відносну завадостійкість δU , фактор якості F_x і щільність компоновання S_N , тобто

$$Q = \frac{L \cdot \delta U}{F_x S_N}.$$

Проте для оцінювання вимог і кола вирішуваних задач оптоелектронними елементами і приладам в [18] запропоновано модифікаційний критерій добротності Q_M , який дає можливість оцінити перспективність використання елементної бази. Крім показників L , δU , F_x і S_N він враховує максимальну граничну частоту переключення оптоелектронних елементів $f_{гр}$, функціональну повноту елементів K_ϕ , час їх енергетичної встановлюваності t_e , тобто час відновлювання інформаційного потоку, коефіцієнт корисної дії (ККД) енергетичного перетворення K_e , ефективність елементів і приладів $K_{e\phi}$ і показник рівня інтеграції F_i :

$$Q_M = Q F_i f_{гр} K_\phi \frac{1}{t_e} K_{e\phi} K_e.$$

Модифікований критерій добротності Q_M тим більший, чим вища гранична частота переключення елементів.

За основними параметрами (швидкодія, споживана потужність, контролездатність) ефективність елементної бази можна ще оцінювати за допомогою усередненого узагальненого критерію, що виражає усереднену суму ефективності за даними параметрами ідеального і реального оптоелектронного приладу, тобто:

$$E = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{ir}}{P_{pr}} + \frac{P_{ip}}{P_{pp}} + \frac{P_{ik}}{P_{pk}} \right),$$

де P_{ir} , P_{pr} , P_{ip} , P_{pp} , P_{ik} , P_{pk} – параметри за швидкістю ідеальних елементів, за контролездатністю ідеальних приладів, за швидкістю реальних приладів, за споживаною потужністю реальних елементів, за контролездатністю реальних приладів, відповідно.

Діапазон зміни E для реальних приладів лежить в межах $0 < E < 1$. Отже, чим ближче E до 1, тим ефективніша оптоелектронна база.

4.6 Критеріальне оцінювання ефективності НВЧ-фільтрів

Надвисокочастотні (НВЧ) фільтри є невід'ємними компонентами багатьох радіотехнічних систем. Різні реалізації фільтрів можуть значно відрізнятися за своїми характеристиками, в залежності від методу синтезу, використовуваної елементної бази і технології виготовлення. В зв'язку з цим виникає закономірне питання: якій реалізації слід дати перевагу? На перший погляд відповідь очевидна, – тій, яка забезпечує кращі електричні характеристики при менших габаритах. Однак фільтри НВЧ характеризуються великим набором параметрів, які взаємозв'язані таким чином, що виграш за одним з параметрів неминуче веде до програшу в іншому. Тому для оцінювання ефективності їх реалізації в [19] запропонований інтегральний критерій, який дозволяє порівнювати НВЧ-фільтри за сукупністю їх характеристик.

За означенням, ідеальний пасивний НВЧ-фільтр забезпечує повне проходження сигналу в заданій смузі частот (смузі пропускання) і повне відбиття не в даній смузі, тобто має ідеально прямокутну амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) (рис. 4.4, а). Якість такого ідеального фільтру доцільно прийняти рівною нескінченності. На практиці ідеально-прямокутна АЧХ недосяжна через: скінченний порядок (кількість ланок) реального фільтра, скінченну добротність його елементів і неідеальне узгодження за входом. Реальний фільтр (рис. 4.4, б) характеризується скінченною крутизною фронтів АЧХ, рівнем послаблення в смузі пропускання L_S , вношуваними втратами в смузі пропускання IL , а також рівнем коефіцієнта відбиття в смузі пропускання (втратами на відбиття) RL . Відмінність крутизни АЧХ реального фільтра від ідеально прямокутної передатної характеристики описується коефіцієнтом прямокутності [19]

$$K_r = \frac{\Delta f + \delta f_1 + \delta f_2}{\Delta f},$$

де в чисельнику знаходиться ширина передатної характеристики за рівнем L_S (рис. 4.4, б). При однаковому значенні K_r найкраще наближення до ідеально-прямокутної АЧХ забезпечує фільтр, який має велике послаблення в смузі запирання. Для ідеального фільтра $K_r = 1$.

Вношувані втрати в смузі пропускання фільтра прямо пропорційні порядку фільтра і обернено пропорційні відносній ширині смуги пропускання і власній добротності резонаторів. При інших рівних умовах більш вузькосмуговий фільтр має великі вношувані втрати. Отже, адекватне порівняння різних фільтрів за рівнем вношуваних втрат може бути тільки при приведенні до смуги пропускання однакової ширині, за яку зручно вибрати смугу з відносною шириною 100 % ($\frac{\Delta f}{f_0} = 1$). Неузгодженість за входом фільтра в смузі пропускання зазвичай характеризують рівнем коефіцієнта

відбиття (RL), вираженим в децибелах або значенням коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ).

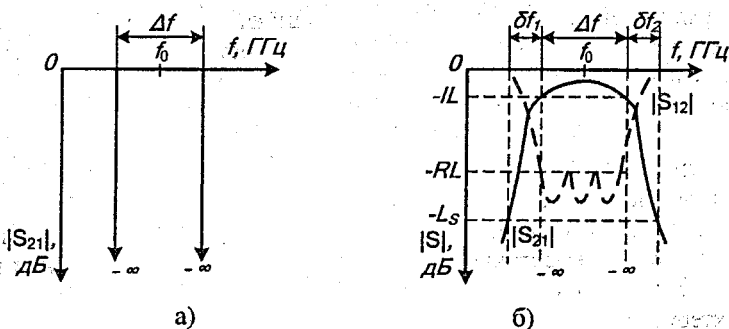


Рисунок 4.4 – АЧХ ідеального (а) та реального (б) смуго-пропускного фільтрів

З урахуванням вищесказаного запропонований інтегральний критерій якості фільтра з точки зору наближення його АЧХ до ідеально-прямокутної характеристики, як [19]

$$F_0 = \frac{L_S}{K_r - 1} \cdot \frac{RL}{IL \Delta f / f_0}, [\text{дБ}],$$

де L_S , IL і RL виражені в децибелах.

В цьому рівнянні F_0 обертається в нескінченність, якщо хоча б один з параметрів відповідає характеристиці ідеального фільтра, для якої: $K_r = 1, L_S \rightarrow \infty, IL = 0, RL \rightarrow \infty$.

Постійне прагнення до все більшої мініатюризації НВЧ-приладів накладає жорсткі обмеження на їх масогабаритні параметри. У пасивних НВЧ фільтрів прагнення до зменшення розмірів приводить до пропорційного зменшення їх частотної вибірковості. Цей недолік відсутній тільки у активних НВЧ фільтрів [29], тому для інтегральних НВЧ-фільтрів пріоритетним параметром є площа підкладки, необхідна для розміщення фільтра.

Для врахування цього параметра критерій ефективності фільтра доповнюють коефіцієнтом, що враховує розміри приладу, віднесені до довжини хвилі,

$$E = F_0 \times \frac{\lambda_g^2}{S + \lambda_g^2}, [\text{дБ}]$$

де λ_g – довжина хвилі в лінії на центральній частоті (f_0),

S – площа, яку займає фільтр.

Такий критерій E дозволяє порівнювати різні реалізації НВЧ-фільтрів.

4.7 Критеріальне оцінювання ефективності струмових конвеєрів

Зараз інтенсивно розвивається схемотехніка інформаційних пристроїв на основі струмових конвеєрів. Струмовий конвеєр – це новий базовий елемент для побудови електронних схем, який в 1968 р. запропонували Седра (Sedra A. S.) та Сміт (Smith K. S.). В 1970 р. вони запропонували вдосконалений варіант конвеєра струму другого покоління ССП (Current Conveyor of the Second generation), який був більш продуктивним блоком для побудови електронних схем. Конвеєр струму є блоком, на базі якого можна реалізувати всі схеми, які реалізуються на операційних підсилювачах (масштабні перетворювачі, інтегратори, диференціатори, суматори, конвертори та інвертори опорів, активні фільтри і т. п.). Струмові конвеєри не отримали тоді розвитку, оскільки в цей час почали активно розвиватися операційні підсилювачі, як базові елементи для побудови різних схем. Багато фірм налагодило їх виробництво та інтерес до струмових конвеєрів зник. І тільки в 90-х роках минулого сторіччя інтерес до струмових конвеєрів знову зріс, оскільки з'явилась необхідність в більш високочастотних та енергоефективних схемах. Струмовий підхід забезпечує певні переваги порівняно з роботою з напругами: більшу швидкодію та частотний діапазон, оскільки схеми можуть працювати на частотах до f_T транзисторів; відсутність необхідності забезпечення великих значень коефіцієнтів підсилення, оскільки для струмових конвеєрів коефіцієнт передачі струму дорівнює одиниці; вони мають високу точність, оскільки не використовуються прецизійні резистори для перетворення струмів в напруги та схеми можуть бути побудовані тільки на транзисторах; мають меншу споживану потужність, оскільки такі схеми менш чутливі до нелінійних спотворень, які виникають при роботі з малими напругами живлення внаслідок нелінійності ВАХ; реалізація струмових конвеєрів на польових МОН-транзисторах забезпечує можливість виготовлення аналогових мікросхем за розвинутою CMOS технологією цифрових мікросхем. Тому цей напрям останнім часом набув широкого розвитку. З'явилися струмові конвеєри третього покоління, конвеєри керовані струмом, диференціальні, універсальні та ін. Однак найзручнішим для синтезу різних схем залишається конвеєр струму другого покоління.

Запропоновано велику кількість схем струмових конвеєрів, в яких кількість транзисторів становить від одного до декількох десятків. Збільшення кількості транзисторів дозволяє точніше реалізувати параметри конвеєра, наближаючи його до ідеального, але при цьому збільшуються складність схеми і енергоспоживання, погіршуються частотні параметри. Покращення одних параметрів може приводити до значного погіршення інших важливих параметрів. Тому виникає задача вибору оптимальної схеми за сукупністю важливих параметрів для конкретного застосування, яку можна вирішити шляхом критеріального оцінювання ефективності схем струмових конвеєрів.

На початковому етапі критеріального оцінювання розв'язується завдання обґрунтування основних параметрів струмового конвеєра щодо ССП (рис. 4.5) в ідеальному випадку описуваних системою рівнянь

$$\begin{cases} I_Y = 0 \\ U_X = U_Y \\ I_Z = \pm I_X \end{cases} \quad (4.38)$$

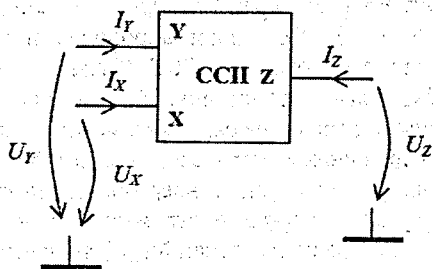


Рисунок 4.5 – Умовне позначення ССП (I_X, I_Y, I_Z – струми електродів; U_X, U_Y, U_Z – напруги між клемми та загальною шиною)

Виходячи з цієї системи, визначаємо такі параметри ССП.

1. Коефіцієнт передачі струму $K_I = I_Z / I_X$. Для ідеального ССП $K_I = 1$.
2. Коефіцієнт передачі напруги $K_U = U_X / U_Y$. Для ідеального ССП $K_U = 1$.
3. Провідність входу Y: $Y_Y = I_Y / U_Y$. Для ідеального ССП $Y_Y = 0$.
4. Опір входу X: $Z_X = U_X / I_X$. Для ідеального ССП $Z_X = 0$.
5. Провідність виходу Z: $Y_Z = I_Z / U_Z$. Для ідеального ССП $Y_Z = 0$.
6. Гранична частота коефіцієнта передачі струму f_{K_I} . Це частота, на якій модуль коефіцієнта передачі струму K_I зменшується у $\sqrt{2}$ порівняно із низькочастотним значенням K_{I0} .
7. Гранична частота коефіцієнта передачі напруги f_{K_U} . Це частота, на якій модуль коефіцієнта передачі напруги K_U зменшується у $\sqrt{2}$ порівняно з низькочастотним значенням K_{U0} .
8. Коефіцієнт енергетичної ефективності $K_E = I_Z / I_0$, де I_0 – струм споживання від джерела живлення. Для ідеального ССП $K_E = 1$.
9. Коефіцієнт динамічного діапазону $K_D = I_{mZ} / I_{\max}$, де I_{mZ} – максимальний струм на виході Z, I_{\max} – максимальний струм транзисторів. Для ідеального ССП $K_D = 1$.

Виходячи з вимог до критерію ефективності про необхідність його нормування, і про мінімальну кількість використовуваних параметрів, запропоновано характеризувати ефективність ССП системою коефіцієнтів.

1. Коефіцієнт точності передачі струму $K'_I = 1 - |1 - K_I|$.

2. Коефіцієнт точності передачі напруги $K'_U = 1 - |1 - K_{U0}|$.
3. Коефіцієнт граничної частоти за струмом $K_{f_{K_I}} = f_{K_I} / f_\alpha$, де f_α – гранична частота однострижкового конвеєра струму.
4. Коефіцієнт енергетичної ефективності ССП $K_E = I_Z / I_0$.

Всі наведені коефіцієнти ефективності є нормованими і можуть набувати значень у діапазоні (0...1). Значення $K_I = 1$ є потенційним і для реального ССП недосяжним. Значення $K_I = 0$ свідчить про технічну несправність ССП.

Інтегральний критерій ефективності запропоновано використовувати у вигляді середнього геометричного від добутку коефіцієнтів ефективності

$$E = \sqrt[4]{K'_I \cdot K'_U \cdot K_{f_{K_I}} \cdot K_E}. \quad (4.39)$$

Критерій (4.39) є нормованим і може також набувати значень у діапазоні (0...1). Величина $E = 1$ відповідає потенційному значенню.

Як приклад наведемо використання критерію (4.39) для оцінювання ефективності ССП, реалізованих на одному, двох і 18-ти КМОП-транзисторах. Використовувались моделі транзисторів з сайту MOSIS (www.mosis.com) для технологічного процесу IBM 130 nm 8RF-8LM-DM. У схемах використані транзистори з такими розмірами: для транзисторів з каналом *n*-типу довжина затвора $L = 250$ нм, ширина затвора $W = 350$ нм; для транзисторів з каналом *p*-типу $L = 250$ нм, $W = 1100$ нм. Напруга живлення 1,2 В. Для цих транзисторів максимальний струм стоку $I_{\max} \approx 115$ мкА. Найбільші граничні частоти f_T транзисторів: для *n*-типу 30 ГГц, для *p*-типу 10 ГГц. При напрузі на затворі, близькій до порогового значення, гранична частота для транзисторів *p*-типу $f_T \approx 1,6$ ГГц.

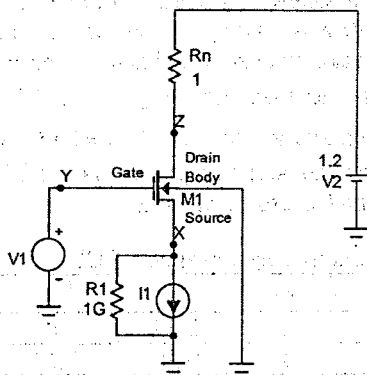


Рисунок 4.6 – Однострижковий конвеєр струму

Схема конвеєра струму на одному транзисторі, яка моделювалась, показана на рис. 4.6. На рис. 4.7 подана частотна залежність коефіцієнта пе-

редачі струму при постійному входному струмі 100 мкА і напрузі 1,1 В. З графіка видно, що на низькій частоті коефіцієнт передачі струму $K_{I0} = 1$, гранична частота коефіцієнта передачі струму $f_{K_I} = f_{\alpha} = 341,5$ ГГц. Коефіцієнт передачі напруги на низькій частоті $K_{U0} = 0,89$. Коефіцієнт енергетичної ефективності для цього конвеєра струму $K_E = 1$, оскільки струм споживання дорівнює струму на виході.

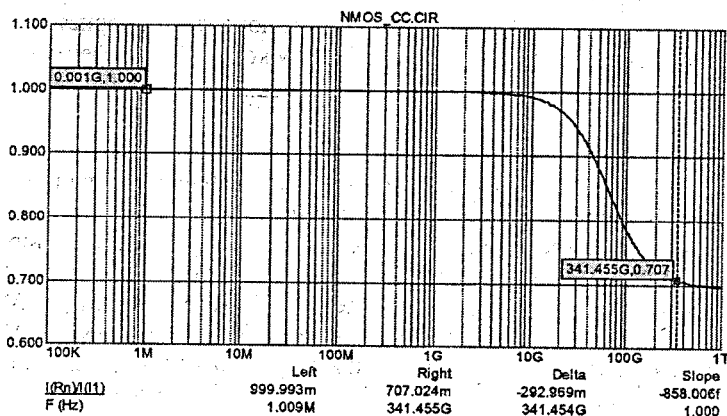


Рисунок 4.7 – Частотна залежність коефіцієнта передачі струму однострипного конвеєра струму

Виходячи з результатів моделювання, розрахункові значення коефіцієнтів ефективності для цього випадку показані в табл. 4.3.

Схема конвеєра струму на двох транзисторах показана на рис. 4.8. На рис. 4.9 показана частотна залежність коефіцієнта передачі струму при постійному входному струмі 100 мкА і напрузі 1,1 В. Струм зміщення $I_2 = 200$ мкА. З графіка видно, що на низькій частоті коефіцієнт передачі струму $K_{I0} = 1$, гранична частота коефіцієнта передачі струму $f_{K_I} = 45,2$ ГГц. Отриманий коефіцієнт передачі напруги на низькій частоті $K_{U0} = 0,96$. Коефіцієнт енергетичної ефективності для цього конвеєра струму дорівнює 0,5, оскільки струм споживання в два рази більший за струм на виході.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти ефективності ССП

Вид ССП	K_I'	K_U'	$K_{f_{K_I}}$	K_E	E
Однострипторний	1	0,89	1	1	0,97
Двострипторний	1	0,96	0,13	0,5	0,5
18-транзисторний	0,98	0,996	0,02	0,22	0,26

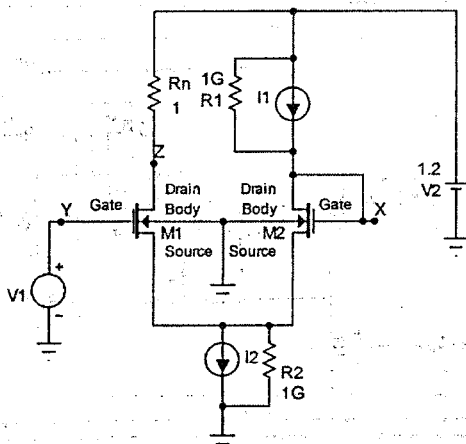


Рисунок 4.8 – Конвеєр струму на двох транзисторах

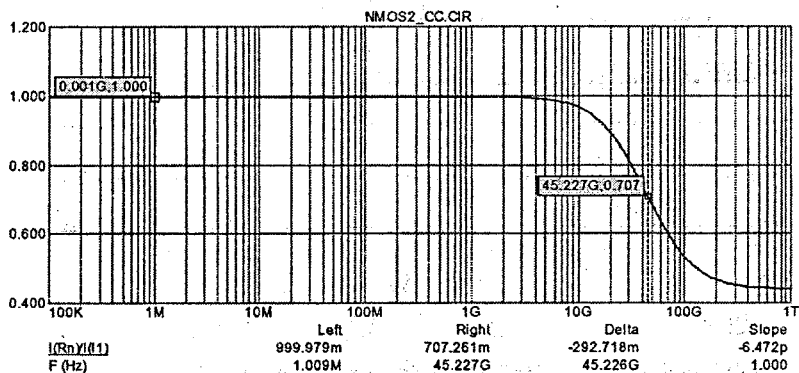


Рисунок 4.9 – Частотна залежність коефіцієнта передачі струму двотранзисторного конвеєра струму

Схема конвеєра струму на 18 транзисторах показана на рис. 4.10. На рис. 4.11 показана частотна залежність коефіцієнта передачі струму для вхідного струму: постійна складова 100 мкА, змінна складова 10 мкА. Постійна напруга на вході Y 1 В. З графіка видно, що на низькій частоті коефіцієнт передачі струму $K_{I0} = 1,02$, гранична частота коефіцієнта передачі струму $f_{K_I} = 7,7$ ГГц. Необхідно зазначити, що у цій схемі коефіцієнт передачі струму практично не залежить від значення струму і напруги на входах X і Y, відповідно. На рис. 4.12 показана частотна залежність коефіцієнта передачі напруги для таких значень вхідної напруги: постійна складова 500 мВ, змінна складова 10 мВ.

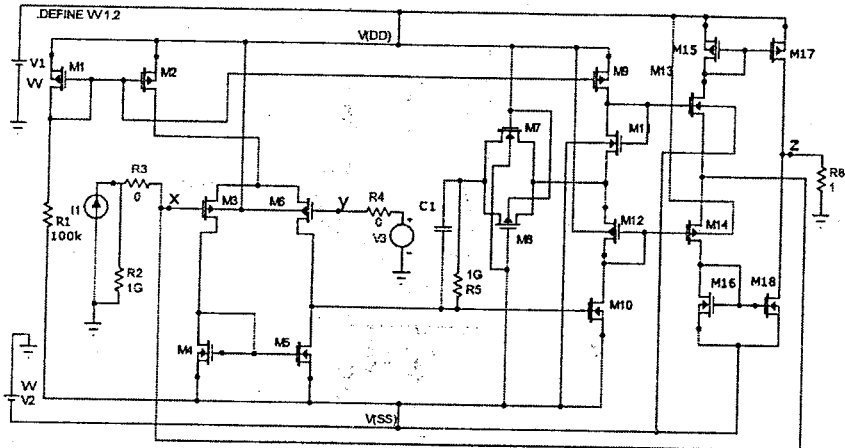


Рисунок 4.10 – Схема конвеєра струму на 18 транзисторах

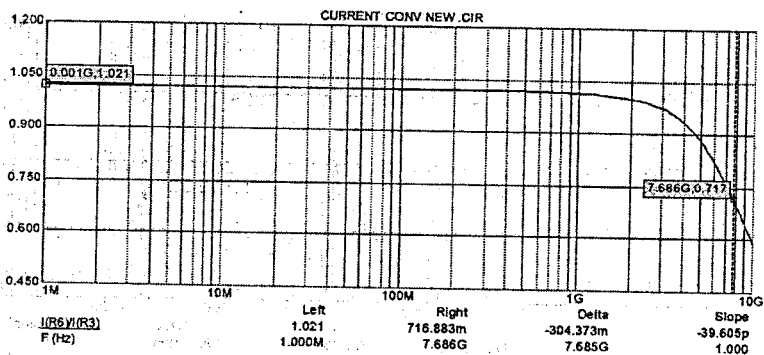


Рисунок 4.11 – Частотна залежність коефіцієнта передачі струму

Постійний струм на вході X дорівнює 100 мкА. З графіка слідує, що $K_{U0} = 0,996$, $f_{K_U} = 0,92$ ГГц. Сумарний струм споживання від джерел живлення склав 258,4 мкА при вихідному струмі 101,6 мкА. Значення вхідного струму і напруги дорівнюють 100 мкА і 1 В, відповідно. Звідки коефіцієнт енергетичної ефективності $K_E = 0,39$. При роботі з малими вхідними струмами коефіцієнт K_E значно менший і дорівнює 0,04 при вхідному струмі 1 мкА. Середнє значення $K_E = 0,22$.

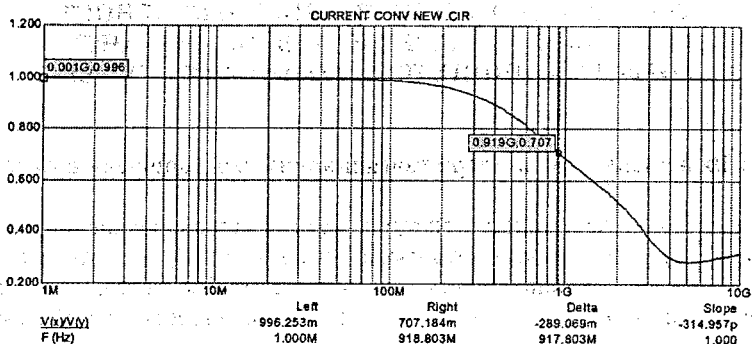


Рисунок 4.12 – Частотна залежність коефіцієнта передачі напруги

Отже, 18-транзисторний конвер струму має $E = 0,26$, найкращий коефіцієнт точності передачі напруги і також високу точність коефіцієнта передачі струму (0,98), але гірші в 50 разів частотні і в 5 разів енергетичні властивості порівняно з однотранзисторним конвером струму, у якого $E = 0,97$.

Контрольні запитання та вправи

1. Яким основним параметром характеризується «максимум ефекту» ІІ?
2. Дайте означення потенційної інформаційної системи (пристрою). Які основні шляхи розрахунку параметрів потенційної ІС і який з них забезпечує максимальну достовірність результатів?
3. Чи можливе отримання інформації без затрати енергії?
4. Нехай інформаційна система (пристрій) має: $\eta_1 = 0,8$, $\eta_\varepsilon = 0,2$, $\eta_e = 0,75$. Розрахувати її узагальнений коефіцієнт ефективності та дати рекомендації щодо його покращення.
5. При якому виді модуляції ІС (ІІ) має більше значення інформаційного ККД: частотно-модульованому або амплітудно-модульованому?
6. Які критерії використовуються при оцінюванні ефективності ІІ?
7. Наведіть алгоритм синтезу комплексного критерію ефективності ІІ.
8. Від яких параметрів каналу зв'язку залежить його інформаційно-енергетичний коефіцієнт корисної дії?
9. Які особливості оптоелектронної елементної бази враховує модифікований критерій їх добротності Q_M ?
10. Які параметри визначають ефективність сучасних смугових НВЧ фільтрів?

5 КРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УЗАГАЛЬНЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМІТАНСУ І ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ НА ЇХ ОСНОВІ

5.1 Визначення і параметри узагальнених перетворювачів імітансу

Більшість інформаційних пристроїв, які є чотириполосниками, можна розглядати як узагальнені перетворювачі імітансу (УПІ). У загальному випадку УПІ – це чотириполосник, імітанс між однією парою клем якого $W_{ВХ}(W_{ВІХ})$ є функцією імітансу $W_{Н}(W_{Г})$, що підключений до другої пари його клем (рис. 5.1, а):

$$W_{ВХ} = F(W_{Н}); W_{ВІХ} = F(W_{Г}).$$

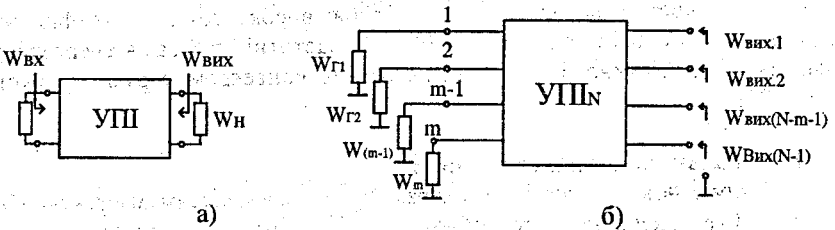


Рисунок 5.1 – Однопараметричний (а) та багатопараметричний (б) УПІ_Н

Такі УПІ називаються однопараметричними. Ширші функціональні можливості мають заземлені багатопараметричні УПІ_Н. Це N-полосник, імітанс між однією групою (N-n) клем якого і спільною шиною, залежить від імітансів $W_{Гi}$, де $i = 1 \div n$; що підключені між другою групою n-клем і спільною шиною: $W_{ВІХj} = F(W_{Гi})$, де $j = (n + 1) \div N$ (рис. 5.1б).

Під імітансом розуміють повний опір або повну провідність, що використовується в конкретному випадку, і позначається символом W , який при характеристиці чотириполосників є узагальненим параметром, під яким розуміють одну з Y , Z , h або g систем параметрів чотириполосників.

Всі типи однопараметричних УПІ можна поділити на конвертори і інвертори імітансу.

Конвертором імітансу називається чотириполосник, імітанс між однією парою клем якого прямо пропорційно залежить від імітансу, що підключається до другої пари його клем. Наприклад, у випадку перетворення повного опору $Z_{Н}$ (пряме перетворення), маємо

$$Z_{ВХ} = (A/D)Z_{Н},$$

де A і D – елементи $[ABCD]$ ланцюгової матриці УПІ (в загальному випадку комплексні), які зв'язують струми та напруги на клеммах УПІ (рис. 5.2).

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}. \quad (5.1)$$

У випадку ідеального конвертора імітансу, матриця (5.1) має вигляд

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

з якої випливає, що він є незасмним і активним, якщо $A \cdot D = 1$.

Відношення

$$A/D = T_k \quad (5.3)$$

називається коефіцієнтом конверсії прямого перетворення, а величина

$$T'_k = 1/T_k \quad (5.4)$$

коефіцієнтом конверсії зворотного перетворення імітансу.

В загальному випадку коефіцієнт конверсії – це комплексна величина. В окремому випадку, коли параметри ланцюгової матриці (5.2) є дійсними числами, коефіцієнт конверсії також дійсна величина. Конвертори імітансу (КІ), що характеризуються таким коефіцієнтом конверсії, називаються дійсними конверторами імітансу.

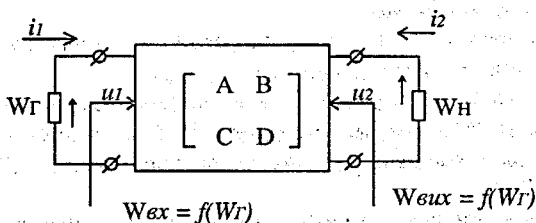


Рисунок 5.2 – Структурна схема узагальненого перетворювача імітансу

Якщо параметри ланцюгової матриці (5.2) характеризуються уявними числами, коефіцієнт конверсії також є уявною величиною, а відповідні КІ називаються уявними. Ідеальним конвертором імітансу називається чотириполосник, коефіцієнт конверсії якого не залежить від імітансу, що перетворюється.

Значення коефіцієнта конверсії T_k не є повним описом конвертора імітансу, матриця якого (5.2) має два параметри A і D . Залежно від співвідношення між параметрами A і D , дійсні конвертори імітансу поділяються на п'ять видів. (табл. 5.1).

Інвертором імітансу називається чотириполюсник, імітанс між однією парою клем якого обернено пропорційно залежить від імітансу, що підключається до іншої пари його клем. Наприклад, у випадку перетворення повного опору навантаження (пряме перетворення) маємо

$$Z_{вх} = B/CZ_{н.}$$

Ланцюгова матриця ідеального інвертора імітансу має вигляд

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

з якої випливає, що інвертор імітансу є невзаємним і активним чотириполюсником.

Відношення

$$B/C = T_i \quad (5.6)$$

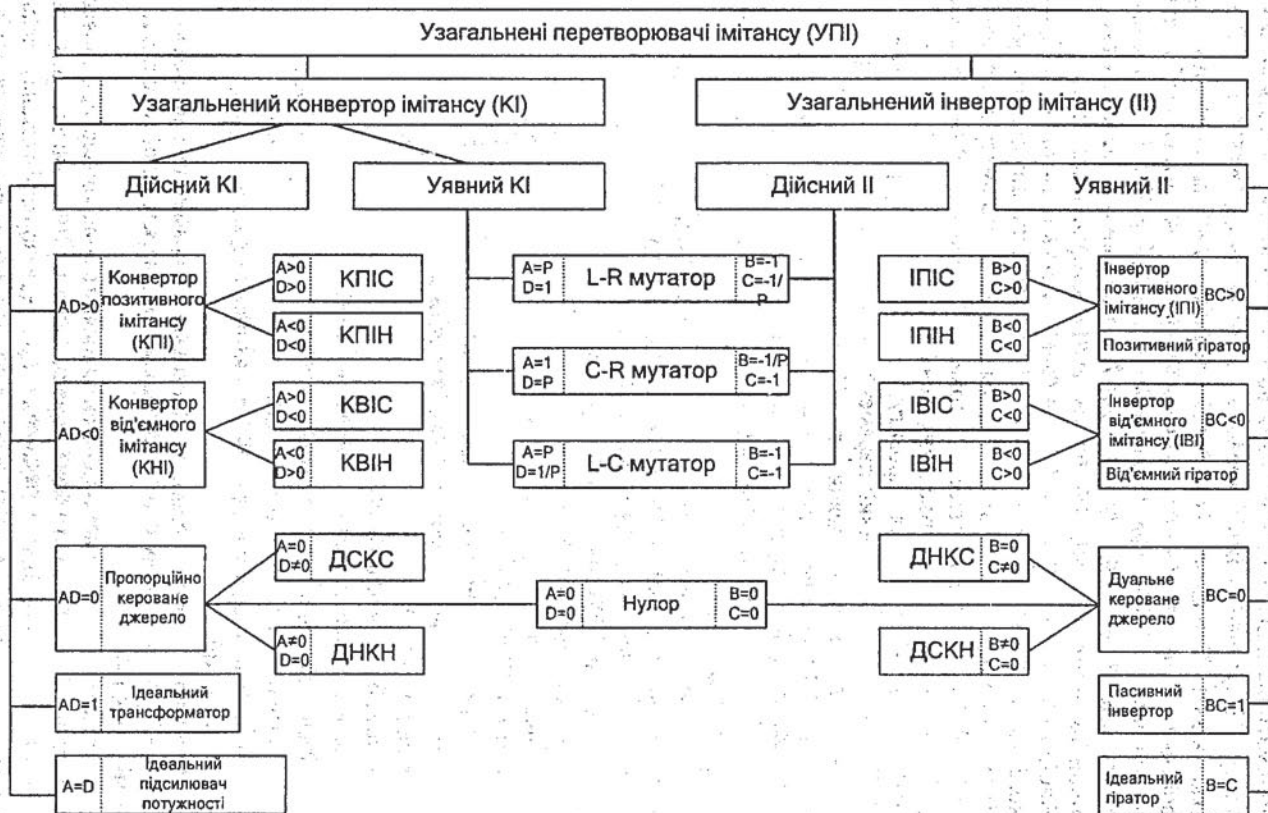
називається коефіцієнтом інверсії прямого перетворення, а величина $W_{гир} = \sqrt{T_i}$ – імітансом гірації прямого перетворення. В загальному випадку це комплексна величина. В окремому випадку, коли параметри ланцюгової матриці (5.5) є дійсні числа, імітанс гірації – також дійсна величина: опір гірації $R_{гир}$, при перетворенні повного опору $Z_{н}$ або провідність гірації $G_{гир}$, при перетворенні повної провідності $Y_{н}$. Інвертори імітансу, які характеризуються дійсним імітансом гірації ($R_{гир}$ або $G_{гир}$), називаються дійсними інверторами імітансу.

Якщо параметри матриці (5.5) характеризуються уявними числами, відповідні інвертори імітансу називаються уявними.

Значення коефіцієнта інверсії T_i , не є повним описом інвертора імітансу, матриця якого (5.5) має два параметри B і C . В залежності від співвідношення між параметрами B і C , дійсні інвертори імітансу поділяються на п'ять видів (табл. 5.1).

За допомогою дійсних і уявних перетворювачів імітансу можна реалізувати як вхідні функції або функції передачі, будь-який раціональний дріб з дійсними коефіцієнтами і довільним співвідношенням ступеня чисельника та знаменника.

Таблиця 5.1 - Основні види узагальнених перетворювачів імітансу



В діапазоні низьких частот при розв'язанні цих задач використовується математична модель УПІ, що складається з коефіцієнта перетворення імітансу T і чутливості цього коефіцієнта до зміни параметрів a_i УПІ – $S_{a_i}^T$ (якість УПІ). При цьому, як правило, передбачається, що коефіцієнт перетворення імітансу є дійсною (як правило рівною 1 або мінус 1) або уявною величиною. Але при практичному використанні УПІ в ІІ необхідна не тільки реалізація заданої функції, але й забезпечення визначених експлуатаційних вимог за стійкістю, рівнем шуму, коефіцієнтом передачі й т. п. Вибір виду та типу УПІ в даному випадку не можна виконувати тільки за коефіцієнтом перетворення та "якості", а необхідно використовувати математичну модель, яка враховує систему робочих параметрів. Основні вимоги до такої моделі містяться в її повноті та точності, тобто вона повинна бути достатньою для визначення основних експлуатаційних параметрів УПІ, з достатньою для проектування ІІ точністю, а також в її об'єктивності, тобто кожний параметр цієї моделі повинен бути вимірним або розрахунковим, виходячи з реальних початкових умов. Крім цього, з інженерної точки зору параметри цієї моделі повинні узгоджуватися (або визначатися за їх допомогою) з класичними системами параметрів (наприклад Y, Z, S і т. п.), які використовуються при розрахунку інших видів електронних пристроїв.

Виходячи з вказаних вимог і досвіду проектування ІІ на основі УПІ, використовується така система робочих параметрів УПІ:

- | | |
|---|---------------------|
| – прямий коефіцієнт перетворення – | T ; |
| – зворотний коефіцієнт перетворення – | T' ; |
| – похибка перетворення – | γ_T ; |
| – інваріантний коефіцієнт стійкості – | $K_{свн}$; |
| – гранична частота – | f_T ; |
| – чутливість коефіцієнта перетворення – | $S_{a_i}^T$; |
| – максимально досяжний коефіцієнт стійкої передачі потужності – | K_{ms} ; |
| – коефіцієнт невзаємності – | K_H ; |
| – максимально досяжне значення від'ємної дійсної складової перетвореного імітансу – | $ReW_{max}^{(-)}$; |
| – оптимальна частота перетворення – | f_{opt} ; |
| – мінімально досяжне значення коефіцієнта шуму – | $f_{шmin}$; |
| – ефективність – | E . |

Визначимо кожен з вище перерахованих параметрів і покажемо, що вони можуть бути виражені через параметри узагальненої W -матриці чотириполюсника.

В зв'язку з тим, що всі види УПІ поділяються на конвертори і інвертори імітансу, їх коефіцієнти перетворення мають різний вигляд. Для конвертора імітансу, виходячи з означення, при перетворенні імітансу навантаження W_H у вхідний імітанс, коефіцієнт прямого перетворення дорівнює

$T_k = W_{\text{вх}}/W_{\text{н}}$ і називається коефіцієнтом прямої конверсії імітансу. При перетворенні імітансу генератора $W_{\text{г}}$ у вихідний імітанс $W_{\text{вих}}$, маємо коефіцієнт зворотного перетворення $T'_k = W_{\text{вих}}/W_{\text{г}}$. Якщо коефіцієнт перетворення імітансу не залежить від перетворюваного імітансу, то такий УПІ називається ідеальним. Вхідний і вихідний імітанси лінійного чотириполосника пов'язані з параметрами його $[W]$ матриці співвідношеннями:

$$W_{\text{вх}} = W_{11} - W_{12}W_{21}/(W_{22} + W_{\text{н}}); \quad (5.7)$$

$$W_{\text{вих}} = W_{22} - W_{12}W_{21}/(W_{11} + W_{\text{г}}). \quad (5.8)$$

Виходячи з (5.7) і (5.8), для реалізації ідеального узагальненого конвертора імітансу необхідні такі вимоги: $\Delta W = 0, W_{22} \gg W_{\text{н}}, W_{11} \gg W_{\text{г}}$. В даному випадку прямий і зворотний коефіцієнти конверсії УПІ визначаються виразами (5.9) і (5.11) в табл. 5.2.

За означенням перетворюваний імітанс $W_{\text{н}}$ узагальненого інвертора імітансу, пов'язаний з перетвореним імітансом $W_{\text{вх}}$ співвідношенням $W_{\text{вх}} = T_i/W_{\text{н}}$, де T_i – коефіцієнт прямої інверсії імітансу. З (5.7) і (5.8) знайдено, що для реалізації ідеального узагальненого інвертора імітансу необхідно забезпечити виконання умов: $W_{11} = 0, W_{22} = 0$. В цьому випадку прямий T_i і зворотний T'_i коефіцієнти інверсії УПІ визначаються виразами (5.10) і (5.12).

У випадку невиконання знайдених умов, коефіцієнт перетворення залежить від перетворюваного імітансу, що вносить в процес перетворення похибку. Для оцінювання значення цієї похибки використовується коефіцієнт (5.13), який визначається при значенні перетворюваного імітансу, яке забезпечує мінімально досягне значення дійсної складової перетвореного імітансу ($W_{\text{г}} = \text{Im}W_{\text{opt}}$ – для зворотного перетворення імітансу).

Властивість УПІ синтезувати від'ємний дійсний імітанс $\text{Re}W^{(-)}$ може призвести до його нестійкості. Кількісно оцінити потенційну нестійкість УПІ можна за допомогою інваріантного коефіцієнта стійкості, який визначається виразом (5.14), справедливим при умовах, одержаних Куліковським А. А. при виведенні імітансного критерію стійкості: 1) $\text{Re}W_{11} > 0, \text{Re}W_{22} > 0$; 2) УПІ стійкий при підключенні до його клем нескінченних імітансів ($W_{\text{г}} = \infty, W_{\text{н}} = \infty$) при цьому характеризується такою $[W]$ -матрицею, що розмірності імітансів W_{11} і W_{22} збігаються відповідно з розмірностями вказаних нескінченних імітансів.

Коли $K_{\text{свн}} > 1$, УПІ абсолютно стійкий при будь-яких значеннях імітансів $W_{\text{г}}$ і $W_{\text{н}}$. В цьому випадку УПІ не може забезпечити компенсацію дисипативних втрат в схемі, що обмежує його функціональні можливості. Для практичного використання УПІ в ПП найцікавішою є область високих частот, в якій він потенційно нестійкий. Дана область обмежена граничними частотами $f_{\text{г}}$.

Таблиця 5.2 – Параметри УПН

Найменування параметра	Розрахункова формула	Номер формули
Прямий коефіцієнт перетворення імітансу W_n : для конвертора – для інвертора –	$T_k = W_{вх}/W_n = W_{11}/W_{22}$, при $\Delta = 0, W_{22} \gg W_n$	(5.9)
	$T_l = W_{вх}/W_n = -W_{12}/W_{21}$, при $W_{11} = W_{22} = 0$	(5.10)
Зворотний коефіцієнт перетворення імітансу: для конвертора: для інвертора:	$T'_k = W_{вих}/W_r = W_{22}/W_{11}$, при $\Delta = 0, W_{11} \gg W_r$	(5.11)
	$T'_l = W_{вих}/W_r = -W_{12}/W_{22}$, при $W_{11} = W_{22} = 0$	(5.12)
Похибка перетворення	$\gamma_T = (T - T_p)/T_p$ при: $W_r = \text{Im}W_{\text{гопт}}$ $W_n = \text{Im}W_{\text{нопт}}$	(5.13)
Інваріантний коефіцієнт стійкості	$K_{\text{свн}} = [2\text{Re}W_{11}\text{Re}W_{22} - \text{Re}(W_{12}W_{21})]/(W_{12}W_{21})$	(5.14)
Гранична частота	f_T при $K_{\text{свн}} = 1$	(5.15)
Чутливість коефіцієнта перетворення імітансу	$S_{a_i}^T = \frac{\partial T}{\partial a_i} \frac{a_i}{T}$	(5.16)
Максимально досяжний коефіцієнт підсилення за потужністю	$K_{ms}(K_{\text{свн}} = 1) = W_{21}/W_{12} $	(5.17)
Коефіцієнт невзасмненості потенційно стійкого УПН - потенційно нестійкого УПН -	$K_n(K_n > 1) = W_{21}/W_{12} ^2 = K_{ms}^2$	(5.18)
	$K_n(K_{\text{свн}} < 1) = \text{Re}W_{22}/\text{Re}W_{11}$	(5.19)
Максимально-досяжне значення від'ємної дійсної складової перетвореного імітансу: при прямому перетворенні при зворотному перетворенні	$\text{Re}W_{\text{max вх}}^{(-)} = W_{12}W_{21} (1 - K_{\text{свн}})/2\text{Re}W_{22}$	(5.20)
	$\text{Re}W_{\text{max вих}}^{(-)} = W_{12}W_{21} (1 - K_{\text{свн}})/2\text{Re}W_{11}$	(5.21)
Оптимальна частота перетворення імітансу	$f_{\text{гопт}}(\partial \text{Re}W_{\text{max}}^{(-)}/\partial f = 0)$	(5.22)
Мінімально досяжне значення коефіцієнта шуму	$F_{\text{шmin}} = F_{\text{ш}}(W_r = W_{\text{гопт}})$	(5.23)
Ефективність, K_i – ваговий коефіцієнт	$E = \left(\prod_{i=1}^n \eta_i^{K_i} \right)^{1/n}$	(5.24)

Однією з вимог, які висуваються до УПІ, є сталість коефіцієнта перетворення. Тому найважливішим критерієм для порівняння різних видів УПІ є чутливість його коефіцієнта перетворення T до зміни a_i параметрів УПІ, що одержала назву "якість перетворювача". Чим менша чутливість УПІ, тим вища його якість. Найбільше практичне значення одержала логарифмічна чутливість коефіцієнта перетворення T до зміни параметра a_i , УПІ. Вона розраховується за допомогою виразу (5.16).

Залежно від співвідношення параметрів УПІ, він може як підсилювати сигнал, так і вносити згасання. Кількісно цю властивість УПІ характеризує його максимально-досяжний коефіцієнт передачі за потужністю на межі стійкості K_{ms} , який визначається виразом (5.17). Також як і інваріантний коефіцієнт стійкості $K_{свн}$, коефіцієнт K_{ms} залежить тільки від параметрів узагальненої $[W]$ -матриці УПІ і визначає номінальний коефіцієнт прямої передачі УПІ за потужністю $K_{ном.21}$. Аналогічно визначається номінальний коефіцієнт $K_{ном.12}$ зворотної передачі УПІ за потужністю:

$$K_{ном.21} = K_{ms}(K_{свн} - \sqrt{K_{свн}^2 - 1}), \quad (5.25)$$

$$K_{ном.12} = K_{ms}(K_{свн} - \sqrt{K_{свн}^2 - 1}). \quad (5.26)$$

Відношення (5.25) до (5.26) характеризує невзаємні властивості УПІ в області їх стійкості, що оцінюються коефіцієнтом невзаємності K_n ($K_{свн} > 1$) (5.18). З виразу (5.18) видно, що в випадку стійкого УПІ, його коефіцієнт невзаємності дорівнює квадрату максимально досяжного коефіцієнта підсилення.

Для потенційно нестійких УПІ ($K_{свн} < 1$), їх двостороннє узгодження неможливе і поняття $K_{ном}$ не має змісту. В цьому випадку УПІ характеризується максимально досяжним значенням від'ємного дійсного імітансу $ReW_{max}^{(-)}$, що показує, яку максимальну величину дисипативних втрат (виражених в одиницях імітансу) може компенсувати даний УПІ.

Розв'язавши рівняння вигляду $\partial W_{вх}/\partial ImW_n = 0$ відносно ImW_n і підставивши знайдене значення

$$ImW_{норт} = \frac{ReW_{11}[|W_{11}W_{22}| - Re(W_{12}W_{21})]}{Im(W_{12}W_{21})} - ImW_{22} \quad (5.27)$$

в (5.7), одержимо вираз (5.20) для $ReW_{max}^{(-)}$. Аналогічно знайдемо за допомогою (5.8) значення

$$ImW_{норт} = \frac{ReW_{22}[|W_{12}W_{21}| - Re(W_{12}W_{21})]}{Im(W_{12}W_{21})} - ImW_{11},$$

підставивши яке в (5.8) визначимо вираз (5.21) для $\text{Re}W_{\text{max вих}}^{(-)}$. Відношення цих імітансів дорівнює коефіцієнту невзаємності $K_H (K_{\text{свн}} < 1)$ (5.19), що характеризує невзаємні властивості УПІ в області його потенційної нестійкості.

В загальному випадку $\text{Re}W_{\text{max}}^{(-)}$ є частотозалежним. Частоту, на якій реалізується максимальне, для даного УПІ, значення $\text{Re}W_{\text{max}}^{(-)}$ при оптимальному значенні перетворюваного імітансу, називається оптимальною частотою перетворення f_{opt} . Відповідно до імітансного критерію стійкості, забезпечення стійкості ПІ на цій частоті є необхідною умовою для його стійкості на інших частотах. Визначення даної частоти здійснюється шляхом розв'язання рівняння (5.22) відносно частоти f_{opt} .

Чутливість і динамічний діапазон ПІ значною мірою визначаються його шумовими властивостями, які залежать від шумових властивостей УПІ. При включенні його в схему як чотириполосника шумові властивості УПІ оцінюються значенням мінімально досяжного коефіцієнта шуму $F_{\text{ш min}}$ (5.23), який залежить тільки від параметрів УПІ і відповідає коефіцієнту шуму УПІ при оптимальній провідності генератора $Y_{GF} = \text{Re}Y_{GF} + j\text{Im}Y_{GF}$.

Розглянуті параметри описують УПІ як елемент ПІ. Але і самостійно, без додаткових елементів, УПІ потрібно розглядати як ПІ (наприклад, в випадку використання його як вимірювального перетворювача, елемента керування і т. п.). В цьому випадку його ефективність слід оцінювати за допомогою узагальненого критерію ефективності E (5.24).

Таким чином, як випливає з табл. 5.2, параметри УПІ виражаються через параметри його узагальненої $[W]$ -матриці, яка інваріантна до будь-якої Y, Z, h або g системи параметрів чотириполосника, що дозволяє розглядати запропоновану систему робочих параметрів УПІ як узагальнену математичну модель УПІ, оскільки вона підходить для аналізу будь-яких видів і типів УПІ, незалежно від використаних в них фізичних ефектів.

Однопараметричні УПІ мають однозначну залежність перетвореного імітансу $W_{\text{вих}} (W_{\text{вих}})$ від перетвореного $W_{\text{н}} (W_{\text{н}})$. В багатопараметричних УПІ_N такої однозначної залежності нема, оскільки в них $W_{\text{вих N}} = (W_{\Gamma 1}, W_{\Gamma 2} \dots W_{\Gamma (N-1)})$. В зв'язку з цим безпосереднє використання розглянутої математичної моделі для багатопараметричних УПІ_N неможливе. Розв'язок цієї задачі отримано шляхом використання поняття «каналу перетворення імітансу», що характеризується функцією

$$W_{\text{вих}j} = F_j(W_{\Gamma j} - \text{var}; W_{\Gamma(j+1)}, \dots, W_{N-1} - \text{const}; [Y_N]),$$

де $|Y_N|$ – невизначена імітансна матриця багатополосника;
 $j = (N - 1)$ – кількість каналів.

В цьому випадку кожний канал перетворення імітансу можна характеризувати набором часткових параметрів b_{ji} , де j – номер параметра, який залежить від параметрів невизначеної матриці N -полюсника $|Y_N|$. Крім того для характеристики багатопараметричних УПП_{*N*}, ряд параметрів втрачає фізичний зміст. Наприклад, для заземленого УПП_{*N*} (рис 5.1 б) втрачають зміст коефіцієнти T'_k і T'_i – оберненого перетворення імітансу, і коефіцієнт невзаємності K_n . Величина S_α^T є технологічною і не впливає на електричні параметри УПП_{*N*}. Виходячи з цього, для порівняльного оцінювання ефективності багатопараметричних УПП_{*N*} використовують таку систему параметрів: $T_k; T_i; K_{свн}; K_{ms}; ReW_{\max\text{вих}}^{(-)}; f_T; f_{opt}; F_{ш}$.

5.2 Критеріальне оцінювання ефективності узагальнених перетворювачів імітансу

5.2.1 Концепція побудови критерію ефективності УПП

Розглянута система робочих параметрів УПП не дає можливості провести їх порівняльне оцінювання за ефективністю. Тому необхідний узагальнений критерій ефективності УПП, який відповідає сформульованим в п. 2.3 вимогам.

Виходячи з цих вимог, в [10] для оцінювання ефективності ПП запропонований критерій ефективності ПП у вигляді

$$E = \left(\prod_{i=1}^n \eta_i^{K_i} \right)^{1/n}, \quad (5.28)$$

де η_i – ККД ПП за i -м параметром, $\eta_i = b_{i \min}/b_i$; $0 \leq \eta_i \leq 1$;

n – кількість враховуваних параметрів b_i , $b_i \geq b_{i \min}$;

K_i – ваговий коефіцієнт, $1 < K_i < \infty$.

Значення критерію ефективності E лежить в межах $0 \leq E \leq 1$.

Враховуючи, що $\eta_i < 1$, застосування вагового коефіцієнта в формі (5.28) виявилось нелогічним, оскільки з його ростом зменшується величина $\eta_i^{K_i}$. Тому в [20] запропонована модифікована форма критерію (5.28):

$$E = \left(\prod_{i=1}^n \gamma_i \eta_i \right)^{1/n}, \quad (5.29)$$

де γ_i – ваговий коефіцієнт ($0 \leq \gamma_i \leq 1$), із збільшенням якого зростає величина $\gamma_i \eta_i$ що є більш природним.

Критерій в формі (5.29) може бути застосований при оцінюванні ефективності однопараметричних УПП. Для оцінювання ефективності багатопараметричних УПП_{*N*} ця задача вирішується шляхом використання «каналу

перетворення імітансу» $W_{\text{ВНХ}j}$ і застосуванням часткових ККД $\eta_{ji} = b_{ji} \min/b_{ji}$ перетворення імітансу за j -тим параметром.

В цьому випадку ефективність кожного каналу перетворення імітансу можна охарактеризувати окремим критерієм вигляду

$$E_j = \left(\prod_{i=1}^n \gamma_i \eta_{ji} \right)^{1/n}, \quad (5.30)$$

Для інтегрального оцінювання ефективності багатопараметричного УПП_N необхідно використовувати сумарний критерій [21]

$$E_{\Sigma} = \left(\prod_{j=1}^{N-1} E_j \right)^{1/(N-1)} = \left[\prod_{j=1}^{N-1} \left(\prod_{i=1}^n \gamma_i \eta_{ji} \right)^{1/n} \right]^{1/(N-1)} = \left[\prod_{j=1}^{N-1} \left(\prod_{i=1}^n \gamma_i \eta_{ji} \right) \right]^{1/n(N-1)}. \quad (5.31)$$

Використання цього критерію забезпечує виконання співвідношення $0 \leq \gamma_i \leq 1$, $0 \leq E_{\Sigma} \leq 1$, що відповідає частині вищеперерахованих вимог. Повна відповідність (5.31) вимогам п. 2.3 залежить від вибору інформаційних параметрів УПП_N і форми їх подання.

5.2.2 Коефіцієнти корисної дії УПІ за робочими параметрами

З урахуванням загальної концепції побудови критерію ефективності багатопараметричних УПП_N потрібно використовувати їх основні параметри і аналітичні визначення часткових критеріїв ефективності. Виходячи з вимог, що сформульовані в п. 2.3 для оцінювання ефективності УПІ кожен канал перетворення імітансу характеризується набором часткових параметрів v_j , де j – номер параметра, що залежить від параметрів невизначеної матриці багатополюсника $[Y_N]$ і, відповідно, частковими ККД перетворення імітансу за j -тим параметром. У цьому випадку ефективність кожного каналу перетворення імітансу оцінюється частковими критеріями (5.30), а для інтегрального оцінювання ефективності багатопараметричного УПП_N використовується сумарний критерій (5.31).

З урахуванням системи робочих параметрів однопараметричних УПІ (табл. 5.2) використовуються вирази для часткових ККД перетворення імітансу η_{ji} в кожному каналі УПП_N (табл. 5.3) [21].

Таблиця 5.3 – Часткові ККД перетворення імітансу в кожному каналі багатопараметричного УП_N

Найменування коефіцієнта ефективності УП	Математичний опис коефіцієнта
Коефіцієнт ефективності УП ^R _{TK} за дійсною частиною коефіцієнта конверсії імітансу	$\eta_{TKj}^R = \frac{1}{1 + \frac{ \operatorname{Re} \Delta }{W_0^2}}$
Коефіцієнт ефективності УП ^X _{TK} за уявною частиною коефіцієнта конверсії імітансу	$\eta_{TKj}^X = \frac{1}{1 + \frac{ \operatorname{Im} \Delta }{W_0^2}}$
Узагальнений коефіцієнт ефективності УП _K за коефіцієнтом конверсії імітансу	$\eta_{TKj} = (\eta_{TK}^R \times \eta_{TK}^X)^{\frac{1}{2}}$
Коефіцієнт ефективності УП ^R _{TI} за дійсною частиною коефіцієнта інверсії імітансу	$\eta_{TI}^R = \frac{1}{(1 + \operatorname{Re} W'_{11})(1 + \operatorname{Re} W'_{22})}$
Коефіцієнт ефективності УП ^X _{TI} за уявною частиною коефіцієнта інверсії імітансу	$\eta_{TI}^X = \frac{1}{(1 + \operatorname{Im} W'_{11})(1 + \operatorname{Im} W'_{22})}$
Узагальнений коефіцієнт ефективності УП _I за коефіцієнтом інверсії імітансу	$\eta_{TI} = (\eta_{TI}^R \times \eta_{TI}^X)^{\frac{1}{2}}$
Коефіцієнт ефективності УП за граничною частотою	$\eta_{fT} = \frac{f_{T2} - f_{T1}}{f_{\max}}$
Коефіцієнт ефективності УП за коефіцієнтом шуму	$\eta_{Fu} = \frac{F_{u, \min}}{F_u}$
Коефіцієнт ефективності УП за внутрішнім інваріантним коефіцієнтом стійкості для режиму потенційної нестійкості	$\eta_{Kc} = \frac{1}{2 + K_c}$
Коефіцієнт ефективності УП за максимально досяжним стійким коефіцієнтом передачі	$\eta_{Kms} = \frac{K_{ms}}{1 + K_{ms}}$
Коефіцієнт ефективності УП за максимально досяжним значенням від'ємного дійсного імітансу	$\eta_{\max}^{R(-)} = \frac{\operatorname{Re} W'_{\max}^{(-)}}{1 + \operatorname{Re} W'_{\max}^{(-)}}$
Коефіцієнт ефективності УП за енергетичними затратами	$\eta_P = \frac{P_{ш, вх}}{P_{ш, вх} + P_0}$

де $\Delta = W_{11}W_{22} - W_{21}W_{12}$;

W_0 – імітанс вимірювального тракту;

f_{\max} – максимальна частота генерації активного приладу;

$F_{u, \min}$ – мінімально досяжне значення коефіцієнта шуму;

$P_{ш, вх}$ – потужність шумів на вході ОП;

f_{T2} і f_{T1} – верхня і нижня граничні частоти, де $K_{свн} = 1$.

Разом з (5.31) система рівнянь в табл. 5.3 утворює математичну модель ефективності багатопараметричного УП_N, для використання якої в основному досить знати імітансні W -параметри УП_N.

Як приклад практичного застосування розробленого критерію, розглянемо ефективність 2-х варіантів УП_N, реалізованих на базі триполосника, що використовує біполярний транзистор (рис. 5.3).

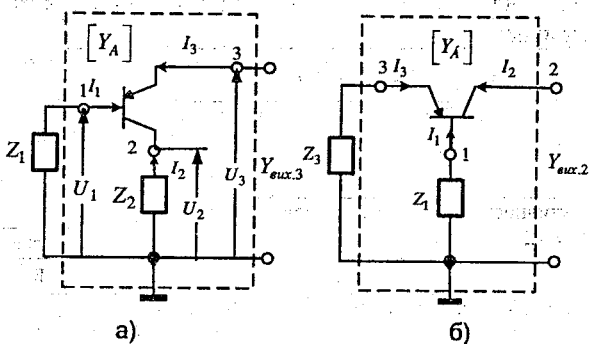


Рисунок 5.3 – Варіанти побудови двопараметричних УПН на базі біполярного транзистора

Невизначена матриця біполярного транзистора визначає зв'язок між струмами I_1 – I_3 , полюсів і напругами U_1 – U_3 між полюсами і загальною шиною

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{22} & y_{33} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

Включення в колі кожного полюса опорів Z_1 – Z_3 веде до зміни напруг полюсів, і в результаті рівняння (5.32) приймає вигляд

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{11} & \bar{y}_{22} & \bar{y}_{33} \\ \bar{y}_{21} & \bar{y}_{22} & \bar{y}_{23} \\ \bar{y}_{31} & \bar{y}_{32} & \bar{y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \end{bmatrix}. \quad (5.33)$$

На підставі (5.33) з урахуванням (5.32) параметри матриці провідності чотириполюсника на рис. 5.3, а будуть дорівнювати:

$$\begin{aligned} Y_{11}^{\Lambda} = \bar{y}_{11} &= \frac{y_{11} + Z_2 \Delta y_1}{1 + Z_2 \Delta y_1}; & Y_{12}^{\Lambda} = \bar{y}_{13} &= \frac{y_{13} - Z_2 \Delta y_1}{1 + Z_2 \Delta y_1}; \\ Y_{21}^{\Lambda} = \bar{y}_{31} &= \frac{y_{31} - Z_2 \Delta y_1}{1 + Z_2 \Delta y_1}; & Y_{22}^{\Lambda} = \bar{y}_{33} &= \frac{y_{33} + Z_2 \Delta y_1}{1 + Z_2 \Delta y_1}, \end{aligned} \quad (5.34)$$

де $\Delta y_1 = U_{11} U_{33} - U_{31} U_{13}$.

Аналогічно для чотириполюсника на рис. 5.3, б, знаходимо:

$$\begin{aligned}
 Y_{11}^B = \bar{y}_{22} &= \frac{y_{22} + Z_1 \Delta y_2}{1 + Z_1 \Delta y_2}; & Y_{12}^B = \bar{y}_{21} &= \frac{y_{21} - Z_1 \Delta y_2}{1 + Z_1 \Delta y_2}; \\
 Y_{21}^B = \bar{y}_{31} &= \frac{y_{31} - Z_1 \Delta y_2}{1 + Z_1 \Delta y_2}; & Y_{22}^B = \bar{y}_{32} &= \frac{y_{32} + Z_1 \Delta y_2}{1 + Z_1 \Delta y_2}
 \end{aligned}
 \tag{5.35}$$

Розрахунок Y-параметрів, що входять до невизначеної матриці рівняння (5.35), може бути проведений з використанням фізичної еквівалентної схеми транзистора.

Підставляючи Y-параметри (5.34) і (5.35) в систему рівнянь табл. 5.3, з урахуванням аналітичних виразів, наведених в табл. 5.2, розраховані часткові η_{ji} ККД перетворення імітансу в схемах рис. 5.3 (табл. 5.4). Для виключення невизначеності, пов'язаної із залежністю параметрів УПН від величини і характеру опорів Z_1-Z_3 , вважаємо $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 10 \text{ Ом}$.

Таблиця 5.4 – Порівняльна оцінка ефективності двопараметричного УПН на базі біполярного транзистора (КТ3115, $f = 0,1 \text{ ГГц}$, $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 10 \text{ Ом}$)

Вид УПН Номер каналу	рисунок 5.3, а		рисунок 5.3, б		
	1-3	2-3	1-3	2-3	
ККД перетворення імітансу – η_i	$\eta_{\text{тк}}^R$	0,97	0,83	0,98	0,63
	$\eta_{\text{тк}}^X$	0,95	0,62	0,96	0,71
	$\eta_{\text{тк}}$	0,96	0,97	0,97	0,67
	$\eta_{\text{ти}}^R$	0,28	0,14	0,11	0,24
	$\eta_{\text{ти}}^X$	0,24	0,24	0,32	0,22
	$\eta_{\text{ти}}$	0,26	0,18	0,18	0,23
	η_{Γ}	0,5	0,42	0,42	0,39
	$\eta_{\text{КС}}$	0,65	0,51	0,54	0,44
	$\eta_{\text{КМС}}$	0,34	0,24	0,32	0,41
	$\eta_{\text{R}}^{(\cdot)} \text{max}$	0,92	0,91	0,95	0,81
	η_{fn}	0,92	0,92	0,75	0,65
	$\eta_{\text{fопт}}$	0,21	0,25	0,43	0,35
	$\eta_{\text{Fш}}$	0,52	0,51	0,54	0,32
	$\eta_{\text{p}} 10^{19}$	1,6	1,6	1,6	1,6
Коефіцієнт ефективності	E_j	0,52	0,52	0,53	0,51
	E_{Σ}	0,52		0,52	

При розрахунку сумарної ефективності E_{Σ} не враховувався енергетичний ККД η_{ji} , оскільки у всіх розглянутих схемах він однаковий і не впливає на порівняльну оцінку.

У той же час низьке значення цього коефіцієнта вказує на першочергову необхідність зниження енергетичних витрат P_0 в УПН, перш за все в колах зсуву транзисторів. Інші значення η_{ji} двох схем УПН близькі за величиною, що зумовило їх однакову за значенням (0,52) сумарну ефектив-

ність. Порівнюючи результати табл. 5.4 із аналогічними результатами для однопараметричних УПІ на базі біполярних транзисторів, спостерігаємо майже двократне зниження ефективності двопараметричного УПІ_N, в порівнянні з однопараметричним, що обумовлено, насамперед, зростанням коефіцієнта шуму УПІ_N ($\eta_{\text{Гш}} = 0, 52$) внесеного резисторами R_1 – R_3 . Використання реактивних опорів як перетворюваних імітансів приведе до зростання $\eta_{\text{Гш}}$, а отже і E_{Σ} .

5.3 Оцінювання ефективності елементів керування на базі транзисторних узагальнених перетворювачів імітансу

При побудові електрично керованих пристроїв автоматики широке застосування одержали елементи з активним (*p-i-n*-діод, фоторезистор, польовий транзистор і ін.) або реактивним (варикап, індуктивний транзистор і ін.) опором, що змінюється під дією керуючого сигналу. Як керуючий елемент (КЕ) можна використовувати узагальнені перетворювачі імітансу на основі польового транзистора в різних схемах включення, що навантажуються реактивним елементом. З урахуванням цього, виникає задача оцінювання їх ефективності як керуючих елементів. В загальному випадку такий комбінований КЕ являє собою чотириполосник, що має властивості УПІ, до входу або до виходу якого підключається двохелектродний КЕ, перетворюваний імітанс якого W_t (або W_n), перетворюється в перетвореній імітанс $W_{\text{вих}}$ ($W_{\text{вх}}$) (рис. 5.4) [22].

5.3.1 Аналітичний метод оцінювання ефективності КЕ

Для оцінювання ефективності елементів керування набули застосування спеціальні коефіцієнти, такі як "якість", що характеризує ефективність елементів керування з активним значенням керуючого параметра і "коефіцієнт перекриття за ємністю", що характеризує ефективність елемента з ємнісним значенням керуючого параметра. Ці коефіцієнти не можуть бути використані для оцінювання ефективності комбінованих елементів керування на основі УПІ, тому що не враховують можливість реалізації з використанням УПІ зміни керуючого параметра в широких межах від негативних до позитивних значень як дійсної, так і уявної складових перетвореного імітансу. Виходячи з цього використовується оцінювання ефективності елементів керування на основі УПІ, що враховує такі умови.

1. Як дійсна, так і уявна складові перетвореного імітансу теоретично можуть приймати значення від $-\infty$ до $+\infty$;
2. Елемент керування працює в лінійному режимі і його вхідний і вихідний імітанс описується виразами (5.7) та (5.8).
3. «Ідеальний» УПІ, який використовується як керуючий елемент, має імітансне коло (рис. 5.5) з центром в початку координат.
4. Ефективність елемента керування зростає зі збільшенням радіуса ρ імітансного кола, що визначається параметрами:

$$\rho_{ax} = |W_{12}W_{21}| / |2\operatorname{Re}(W_{22} + W_H)|, \quad \rho_{вих} = |W_{12}W_{21}| / |2\operatorname{Re}(W_{11} + W_r)|. \quad (5.36)$$

5. Відхилення центра імітансного кола від початку координат на імітансній площині веде до погіршення ефективності елемента керування.

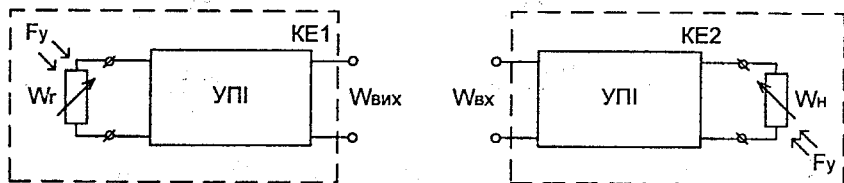


Рисунок 5.4 – Узагальнені схеми комбінованих КЕ на основі УПІ

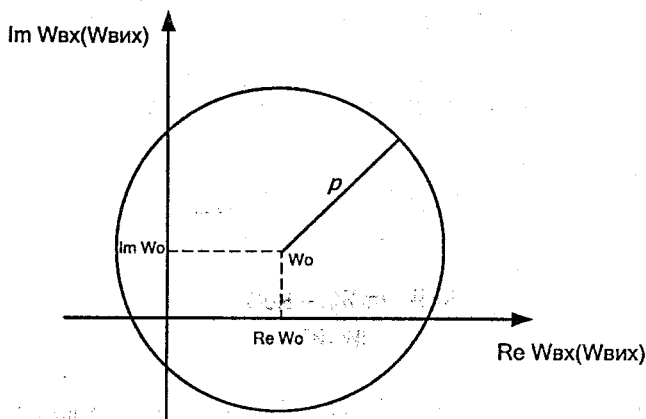


Рисунок 5.5 – Імітансне коло реального УПІ в лінійному режимі

Виходячи з перерахованих умов, ефективність елементів керування на основі УПІ можна оцінити коефіцієнтом [22]:

$$E = \rho / [(1 + |\beta_R|)(1 + |\beta_X|)], \quad (5.37)$$

де $\beta_R = \operatorname{Re}W_0 / \rho$ – коефіцієнт відхилення центра імітансного кола в напрямку осі абсцис. Цей коефіцієнт також є інваріантним коефіцієнтом стійкості УПІ, тобто $\beta_R = K_{свн}$. Таким чином, можливий діапазон зміни β_R : $-1 \leq \beta_R < \infty$;

$\beta_X = \text{Im} W_0 / \rho$ – коефіцієнт відхилення центра імітансного кола в напрямку осі ординат: $-\infty < \beta_X < \infty$;

$\text{Re} W_0, \text{Im} W_0$ – координати центра імітансного кола по входу і виходу

УПІ:

$$\text{Re} W_{ex.0} = \text{Re} W_{11} - \frac{\text{Re}(W_{12} W_{21})}{2 \text{Re} W_{22}}; \quad \text{Re} W_{ex.0} = \text{Re} W_{22} - \frac{\text{Re}(W_{12} W_{21})}{2 \text{Re} W_{11}}; \quad (5.38)$$

$$\text{Im} W_{ex.0} = \text{Im} W_{11} - \frac{\text{Im}(W_{12} W_{21})}{2 \text{Re} W_{22}}; \quad \text{Im} W_{ex.0} = \text{Im} W_{22} - \frac{\text{Im}(W_{12} W_{21})}{2 \text{Re} W_{11}}; \quad (5.39)$$

Враховуючи діапазон змін можливих значень β_R і β_X , на підставі (5.37) визначаємо діапазон зміни ефективності КЕ на основі УПІ: $0 < E \leq \rho_{\max}$, де: $\rho_{\max,ex} = |W_{12} W_{21}| / |2 \text{Re}(W_{22})|$, $\rho_{\max,exx} = |W_{12} W_{21}| / |2 \text{Re}(W_{22})|$.
Одиниця його значення – одиниці імітансу (Ом або См).

Використовуючи (5.36), (5.38), (5.39), знаходимо:

$$\beta_{R,ex} = \beta_{R,exx} = \frac{2 \text{Re} W_{11} \text{Re} W_{22} - \text{Re}(W_{12} W_{21})}{|W_{12} W_{21}|}; \quad (5.40)$$

$$\beta_{X,ex} = \frac{2 \text{Re} W_{22} \text{Im} W_{11} - \text{Im}(W_{12} W_{21})}{|W_{12} W_{21}|}; \quad (5.41)$$

$$\beta_{X,exx} = \frac{2 \text{Re} W_{11} \text{Im} W_{22} - \text{Re}(W_{12} W_{21})}{|W_{12} W_{21}|}. \quad (5.42)$$

Підставляючи (5.40), (5.41), (5.42) у (5.37), одержимо вираз для коефіцієнта ефективності, виражений через імітансні параметри УПІ:

$$E_{ex} = \frac{|W_{12} W_{21}|^3}{2 \text{Re} W_{22} [|W_{12} W_{21}| + |2 \text{Re} W_{11} \text{Re} W_{22} - \text{Re}(W_{12} W_{21})|]} \times \frac{1}{[|W_{12} W_{21}| + |2 \text{Re} W_{22} \text{Im} W_{11} - \text{Im}(W_{12} W_{21})|]}; \quad (5.43)$$

$$E_{exx} = \frac{|W_{12} W_{21}|^3}{2 \text{Re} W_{22} [|W_{12} W_{21}| + |2 \text{Re} W_{11} \text{Re} W_{22} - \text{Re}(W_{12} W_{21})|]} \times \frac{1}{[|W_{12} W_{21}| + |2 \text{Re} W_{11} \text{Im} W_{22} - \text{Im}(W_{12} W_{21})|]}. \quad (5.44)$$

Аналіз виразів (5.43) і (5.44) показує, що в оптимальному випадку (рис. 5.6, а) координати центра імітансного кола, а отже і коефіцієнти відхилення β_R і β_X дорівнюють нулю і коефіцієнт ефективності $E = \rho$. Таким чином, коефіцієнт ефективності ідеального елемента керування на базі УПІ прямо пропорційний радіусу імітансного кола і, як випливає з (5.36), може бути збільшений за рахунок зниження значень $\text{Re}W_{11}$ і $\text{Re}W_{22}$.

Якщо координати центра імітансного кола не дорівнюють нулю, відбувається його зміщення на імітансній площині. Характерні варіанти такого зміщення і відповідні їм значення коефіцієнтів відхилення β_R , β_X і коефіцієнта ефективності E показані на рис. 5.6, б-ж. Негативне значення β_R свідчить про наявність у елемента керування негативного дійсного імітансу, а негативне значення β_X вказує на індуктивний (для $W=Y$ -параметрів) або ємнісний (для $W=Z$ -параметрів) характер імітансу керування.

Під час побудови приладів керування найхарактернішою задачею є створення елемента керування, що має в діапазоні перебудови змінне значення уявного (дійсного) імітансу зі збереженням постійного значення (в ряді випадків нульового) дійсного (уявного) імітансу. Перший випадок аналогічний елементам керування типу варикап, а другий випадок – елементам керування типу $p-i-n$ діод. Для оцінювання ефективності елементів керування на базі УПІ в режимах, що розглядаються, введемо коефіцієнти ефективності D_R^0 і D_X^0 , що характеризують діапазон перебудови, відповідно за дійсною і уявною складовою.

$$D_R^0 = 2\rho / \sqrt{1 + \beta_X^2}, \quad (5.45)$$

$$D_X^0 = 2\rho / \sqrt{1 + \beta_R^2}. \quad (5.46)$$

З (5.45) і (5.46) видно, що в випадку елемента керування з ідеальним імітансним колом, діапазон перебудови як за дійсною, так і за уявною складовими дорівнює 2ρ ($\beta_R = 0$, $\beta_X = 0$), і зменшується з відхиленням центра імітансного кола від початку координат імітансної площини. У випадку, коли $\beta_X > 1$, неможливе створення реактивних елементів керування з нульовим дійсним імітансом, а у випадку коли $\beta_R > 1$ – активного елемента керування з нульовим уявним імітансом.

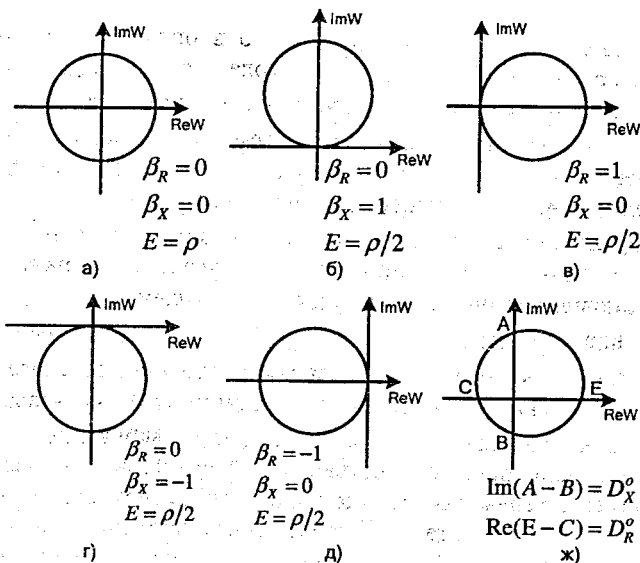


Рисунок 5.6 – Критичні положення імітансного кола УПІ

З аналізу виразів (5.36), (5.38–5.46) видно, що максимальний діапазон перебудови досягається у випадку, коли використовується перетворюваний імітанс без дисипативних втрат ($\text{Re}W_H = 0$, $\text{Re}W_Z = 0$), тобто коли використовується чисто уявний перетворюваний імітанс у процесі керування як дійсною, так і уявною складовою перетвореного імітансу. При цьому для розробника важливо, який потребується діапазон змін перетворюваного імітансу для забезпечення необхідного інтервалу зміни перетвореного імітансу. Числове оцінювання цієї властивості можна провести, використавши інтегральну крутизну елемента керування для дійсної (S^R) і уявної (S^X) складових, що визначаються виразами:

$$S^R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{X'_{\max} - X'_{\min}} \quad (5.47)$$

$$S^X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X'_{\max} - X'_{\min}} \quad (5.48)$$

де R_{\max} , R_{\min} – максимальне і мінімальне значення дійсної складової перетвореного імітансу;

X_{\max}, X_{\min} – максимальне і мінімальне значення уявної складової перетвореного імітансу;

X'_{\max}, X'_{\min} – максимальне і мінімальне значення уявної складової перетворюваного імітансу.

З урахуванням (5.7) та (5.8), значення для інтегральної крутизни елемента керування, які виражені через W -параметри УПІ будуть дорівнювати:

$$S_{\text{ex}}^R = |W_{12}W_{21}| / \text{Re}^2(W_{22}D_R^X); \quad S_{\text{six}}^R = |W_{12}W_{21}| / \text{Re}^2(W_{11}D_R^X); \quad (5.49)$$

$$S_{\text{ex}}^X = |W_{12}W_{21}| / \text{Re}^2(W_{22}D_X^X); \quad S_{\text{six}}^X = |W_{12}W_{21}| / \text{Re}^2(W_{11}D_X^X); \quad (5.50)$$

де D_R^X – діапазон перебудови уявної складової перетворюваного імітансу, що відповідає зміні дійсної складової перетвореного імітансу.

Аналіз виразів (5.47), (5.48) показує, що елемент керування на базі УПІ доцільно використати у випадку, коли S^R і S^X більші одиниці. Однак в деяких випадках застосування елемента керування з інтегральною крутизою менше одиниці може бути виправдане покращенням інших характеристик пристрою (наприклад, під час створення керованої індуктивності).

Сукупність виразів (5.37–5.50) складає математичну модель ефективності елемента керування на базі УПІ і може бути використана, за умови виконання вищевведених граничних умов, незалежно від фізичної природи УПІ.

Як приклад, проведемо оцінювання ефективності елементів керування на базі транзисторних перетворювачів імітансу. Аналіз проведемо відповідно до УПІ на базі біполярного і польового транзисторів, що описані матрицями провідності. В результаті на основі виразів (5.37–5.50) можна отримати математичні моделі ефективності елементів керування на базі біполярних і польових транзисторів виражені через параметри їх фізичних еквівалентних схем. Вони дозволяють здійснити вибір найефективнішої схеми ввімкнення транзистора в режимі УПІ.

Враховуючи, що одностранзисторні УПІ найефективніші в діапазоні ВЧ і НВЧ при ввімкненні біполярних транзисторів зі спільним колектором і спільною базою, а польових транзисторів у всіх трьох схемах їх ввімкнення, проведені дослідження ефективності даних схем. Результати показано на рис. 5.7–5.9.

На рис. 5.7 подано результати числового аналізу коефіцієнта ефективності елемента керування на базі УПІ з спільним колектором (УПІ^К) в режимі прямого і зворотного перетворення імітансу. Результати числового аналізу коефіцієнта ефективності E_B елемента керування на базі УПІ^Б показують, що найефективнішим є застосування такого елемента в режимі прямого перетворення імітансу на частотах, близьких до граничної частоти

транзистора, де значення коефіцієнта E_E в 20–40 разів більше, ніж для елемента керування на базі УПІ^К. На частотах нижче $0,5\omega_T$ застосування елемента керування на базі УПІ з спільною базою (УПІ^Б) в режимі прямого перетворення імітансу неефективне.

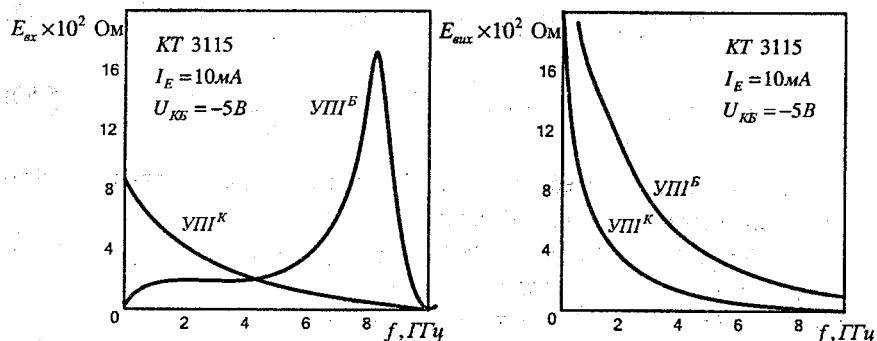


Рисунок 5.7 – Частотні залежності узагальненого коефіцієнта ефективності E елементів керування на базі УПІ, що використовують біполярний транзистор, який ввімкнено за схемою зі спільним колектором (УПІ^К) та спільною базою (УПІ^Б)

На рис. 5.8 показано результати експериментального оцінювання ефективності елементів керування на базі УПІ^Б, що використовують різні типи транзисторів. Як видно з графіків, можливе підвищення ефективності КЕ за рахунок вибору типу транзистора. Порівняння елементів керування на базі УПІ^К і УПІ^Б показує, що на частотах менших $0,5\omega_T$ найефективніше використовувати УПІ^К, а на вищих частотах УПІ^Б.

Аналіз ефективності елементів керування на базі польових транзисторів показав (рис. 5.9), що на частотах вище 1 ГГц більшу ефективність (в 1,5–2 рази) мають елементи керування на базі УПІ^Б, що використовують зворотне перетворення імітансу.

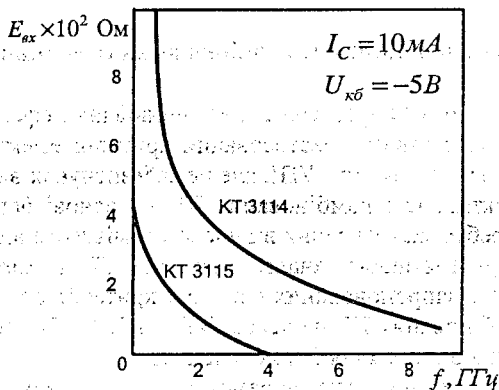


Рисунок 5.8 – Частотна залежність узагальненого коефіцієнта ефективності E елементів керування на базі УПІ^Б, що використовують різні типи біполярних транзисторів

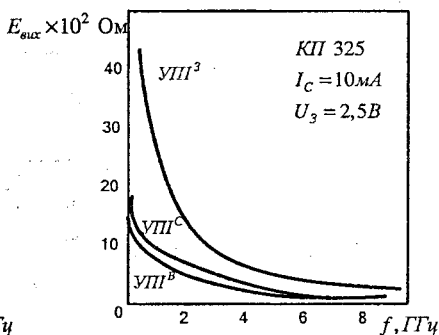
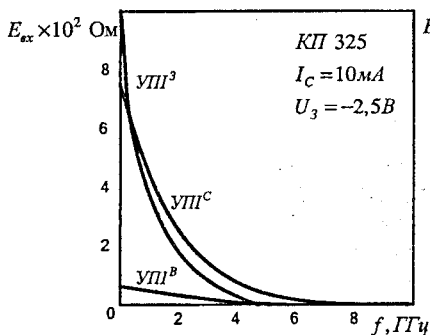


Рисунок 5.9 – Частотні залежності узагальненого коефіцієнта ефективності E елементів керування на базі УПІ, що використовують польовий транзистор

У випадку реалізації елементів керування на базі польових транзисторів із загальним витоком (УПІ^Б), їх узагальнений коефіцієнт ефективності має найменше значення у порівнянні з елементами керування на базі УПІ^С і УПІ^Е. Тому застосування такого елемента керування на високих і надвисоких частотах є недоцільним.

5.3.2 Графоаналітичний метод оцінювання ефективності керуючих елементів

В випадку, що розглянуто вище, для оцінювання ефективності комбінованих керуючих елементів застосований критерій ефективності, який в основному враховує параметри УПН, але не забезпечує їх використання для оцінювання ефективності комбінованих КЕ на основі багатопараметричних УПН, і потребує застосування відносно громіздкого аналітичного апарату, що погіршує можливості аналізу і оптимізації параметрів таких КЕ. З метою розширення запропонованих в п. 5.3.1 критеріїв розрахунку ефективності щодо комбінованих КЕ на основі УПН в [23] обґрунтований графоаналітичний метод оцінювання їх ефективності.

В загальному випадку багатопараметричний КЕ являє собою заземлений УПН, утворений N-полосником між (N-1) полюсами якого і загальною шиною підключені перетворювані імітанси W_{Γ} , що залежать від керуючого впливу F , що приводить до зміни вихідного перетвореного імітансу $W_{\text{вих}}$ УПН (рис. 5.10). Ефективність такого КЕ тим вища, чим ширший діапазон зміни перетвореного імітансу $W_{\text{вих}}$ при певному діапазоні зміни W_{Γ} .

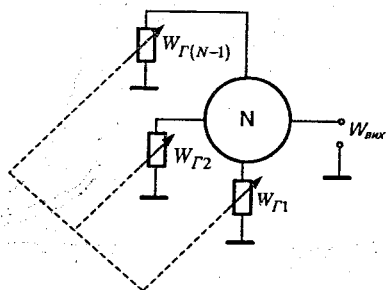


Рисунок 5.10 – Комбінований КЕ на основі УПН

Для оцінювання ефективності такого КЕ необхідно враховувати вплив на перетворений імітанс $W_{\text{вих}}$ змін кожного з перетворюваних імітансів W_{Γ} . Відносна складність даної задачі може бути спрощена за рахунок використання поняття «каналу перетворення імітансу». В цьому випадку розглядається залежність перетвореного імітансу $W_{\text{вих}}$ від i -го перетворюваного імітансу, коли значення інших перетворюваних імітансів залишаються сталими. У квазілінійному режимі графічно цю залежність можна подати у вигляді імітансного кола (рис. 5.11).

Ефективність кожного каналу перетворення імітансу УПН, використовуваного в багатопараметричному КЕ, оцінимо за допомогою коефіцієнта

Максимальне значення $\rho_{вих}$, а відповідно і K_1 , досягається при чисто реактивному перетворюваному імітансі, коли $\text{Re}W_r = 0$. При цьому, більшу ефективність матиме такий КЕ на основі УПН, у якого більшому діапазону зміни дійсної $R_{\text{max}} = \text{Re}(W_{вих\text{max}} - W_{вих\text{min}})$ чи уявної $X_{\text{max}} = \text{Im}(W_{вих\text{max}} - W_{вих\text{min}})$ складової перетвореного імітансу за кожним каналом буде відповідати менше значення зміни уявної $X_{\text{opt}} = \text{Im}(W_{r\text{max}} - W_{r\text{min}})$ складової перетворюваного імітансу W_r . Цей імітанс значною мірою залежить від положення діаметра імітансного кола і кількісно можна охарактеризувати коефіцієнтами оптимальної крутизни перетворення:

$$S_{X,\text{opt}}^{R\text{max}} = \text{Im}(W_{12}W_{21})/2\text{Re}W_{11}\text{Re}W_{22}; \quad (5.53)$$

$$S_{X,\text{opt}}^{X\text{max}} = \text{Re}(W_{12}W_{21})/2\text{Re}W_{11}\text{Re}W_{22}. \quad (5.54)$$

Враховуючи, що діапазон зміни цих коефіцієнтів лежить в межах $(0-\infty)$, для приведення його до діапазону $(0-1)$, подамо коефіцієнти оптимальної ефективності положення осі імітансного кола у вигляді:

– для КЕ з керованою дійсною складовою імітансу

$$K_{2i} = 2\text{arctg}S_{X,\text{opt}}^{R\text{max}}/\pi; \quad (5.55)$$

– для КЕ з керованою уявною складовою перетвореного імітансу

$$K_{3i} = 2\text{arctg}S_{X,\text{opt}}^{X\text{max}}/\pi. \quad (5.56)$$

Коефіцієнти $K_{1i} - K_{3i}$ змінюються в діапазоні $(0-1)$ і характеризують ефективність кожного каналу перетворення імітансу УПН, який входить до складу комбінованого КЕ.

Будь-який двохелектродний КЕ має як дійсну $\text{Re}W_r$, так і уявну $\text{Im}W_r$ складові імітансу, який перетворюється в імітанс $W_{вих}$, що також має як дійсну так і уявну складові. Тому реальний діапазон зміни перетворення імітансу будемо характеризувати нормованими коефіцієнтами перекриття КЕ:

– за дійсною складовою

$$K_{4i} = |\text{Re}(W_{вих1} - W_{вих2})|/2\rho_{вих}; \quad (5.57)$$

– за уявною складовою

$$K_{5i} = |\operatorname{Im}(W_{\text{aux}1} - W_{\text{aux}2})| / 2p_{\text{aux}}, \quad (5.58)$$

де $W_{\text{aux}1}$ і $W_{\text{aux}2}$ – значення перетвореного імітансу, який відповідає крайнім наведеним значенням $\bar{W}_{\Gamma 1i}$ і $\bar{W}_{\Gamma 2i}$ перетворюваного імітансу (див. рис. 5.11) двохелектродного КЕ.

Діапазон зміни K_{4i} і K_{5i} аналогічний діапазону зміни $K_{1i} - K_{3i}$.

Важливим параметром, який характеризує ефективність системи, утвореної УПН та двохелектродним КЕ, також є величина крутизни зміни стану перетвореного імітансу W_{aux} від величини складової перетворюваного імітансу W_{Γ} двохелектродного КЕ:

$$\left. \begin{aligned} S_{Xi}^X &= \frac{\operatorname{Im}(W_{\text{aux}1} - W_{\text{aux}2})}{\operatorname{Im}(W_{\Gamma 1} - W_{\Gamma 2})}; S_{Ri}^X = \frac{\operatorname{Im}(W_{\text{aux}1} - W_{\text{aux}2})}{\operatorname{Re}(W_{\Gamma 1} - W_{\Gamma 2})} \\ S_{Xi}^R &= \frac{\operatorname{Re}(W_{\text{aux}1} - W_{\text{aux}2})}{\operatorname{Im}(W_{\Gamma 1} - W_{\Gamma 2})}; S_{Ri}^R = \frac{\operatorname{Re}(W_{\text{aux}1} - W_{\text{aux}2})}{\operatorname{Re}(W_{\Gamma 1} - W_{\Gamma 2})} \end{aligned} \right\} \quad (5.59)$$

Для оцінювання ефективності КЕ за крутизною на основі (5.59) отримаємо коефіцієнти ефективності вигляду:

$$\left. \begin{aligned} K_{6i} &= 2 \operatorname{arctg} S_{Xi}^X / \pi; K_{7i} = 2 \operatorname{arctg} S_{Ri}^X / \pi \\ K_{8i} &= 2 \operatorname{arctg} S_{Xi}^R / \pi; K_{9i} = 2 \operatorname{arctg} S_{Ri}^R / \pi \end{aligned} \right\} \quad (5.60)$$

Отримані коефіцієнти ефективності $K_{1i} - K_{6i}$ дозволяють, шляхом їх комбінації, отримати аналітичні вирази критеріїв ефективності кожного каналу керування розглянутого КЕ на основі УПН в залежності від вимог, що висувуються до них. Найбільш характерними вимогами є:

– отримання найбільш ефективного керування дійсною складовою перетвореного імітансу, який описується критерієм

$$E_{Ri} = (K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{4i} \cdot K_{8i} \cdot K_{9i})^{1/5}; \quad (5.61)$$

– отримання найбільш ефективного керування уявною складовою перетвореного імітансу, який описується критерієм

$$E_{Xi} = (K_{1i} \cdot K_{3i} \cdot K_{5i} \cdot K_{6i} \cdot K_{7i})^{1/5}. \quad (5.62)$$

З урахуванням впливу всіх каналів перетворення імітансу, на підставі (5.61) і (5.62), знаходимо критерій ефективності керування багатопараметричним КЕ за дійсною E_R та уявною E_X складовими перетвореного імітансу

$$E_R = \left(\prod_{i=1}^n E_{Ri} \right)^{1/n}; \quad E_x = \left(\prod_{i=1}^n E_{Xi} \right)^{1/n}, \quad (5.63)$$

а також результуючий критерій ефективності комбінованого КЕ на основі багатопараметричного УПН

$$E = \sqrt{E_R \cdot E_x}. \quad (5.64)$$

При виведенні узагальненого E і часткових K_i і E_i коефіцієнтів ефективності використовувалися середньгеометричні оцінки, що, як показано в [10], дозволяє зменшити вплив екстремальних значень складових на остаточний результат оцінювання ефективності.

Враховуючи, що $\rho_i < \rho_{\max}$, $-1 \leq \beta_R < \infty$, $-\infty < \beta_x < \infty$, $|R_{\max}| \leq 2\rho_i$, $|X_{\max}| \leq 2\rho_i$ знаходимо: $0 \leq S_{Ri}^R \leq 1$; $0 \leq S_{Xi}^R \leq 1$; $0 \leq S_{Ri}^X \leq 1$; $0 \leq S_{Xi}^X \leq 1$; $0 \leq K_i \leq 1$; $0 \leq E_{Ri} \leq 1$; $0 \leq E_{Xi} \leq 1$; $0 \leq E \leq 1$, тобто як часткові, так і узагальнений коефіцієнти ефективності є нормованими, мають ясний фізичний зміст і певні межі, що відповідає вимогам, що висуваються до критеріїв ефективності, і дозволяють розв'язувати задачі оцінювання ефективності комбінованих КЕ і оптимізації їх параметрів. Перевагою розглянутого критерію є також можливість врахування впливу як дійсної, так і уявної складових перетворюваного імітансу, що не враховує ні коефіцієнт перекриття за смістю варикапа, ні «якість» p - i - n діода.

Використання розглянутих аналітичних виразів потребує проведення великого об'єму обчислень із застосуванням громіздкого математичного апарату, що описує використовуваний N -полосник. Простіше ця задача розв'язується графоаналітичним методом. В основі методу лежить теорема конформних відображень, відповідно до якої, на імітансній площині $W_{\text{вих}}$ пряма лінія $\text{Re}W_{\Gamma} = 0$ відображується колом (рис. 5.11) з центром W_{0i} і радіусом ρ_{0i} . Координати будь-якої точки цього кола однозначно залежать тільки від $\text{Im}W_{\Gamma}$. Якщо $\text{Re}W_{\Gamma} \neq 0$, але сталий, то залежність $W_{\text{вих},i}(\text{Im}W_{\Gamma})$ також являє собою коло, що знаходиться всередині першого кола, дотичну з нею в точці W_{21i} , а центри цих кіл лежать на прямій, що складає з віссю $\text{Im}W_{\text{вих},i} = 0$ кут $\Psi = \arctg [\text{Re}(W_{12i}W_{21i}) / \text{Im}(W_{12i}W_{21i})]$.

Вимірявши або розрахувавши з використанням невизначеної матриці N -полосника, імітансні W_i -параметри каналу перетворення імітансу: W_{12} , W_{21} , W_{11} і W_{22} будемо на комплексній площині перетворюваного імітансу коло, що визначає $W_{\text{вих},i}$ для всіх можливих значень W_{Γ} ($0 < \text{Re}W_{\Gamma} < \infty$, $-\infty < \text{Im}W_{\Gamma} < \infty$). Для ідентифікації значень перетворюю-

ваних імітансів W_{Γ} на комплексній площині $W_{\text{вн},i}$, використовуємо властивість розглянутого імітансного кола, яка при введенні нормування для перетвореного імітансу вигляду:

$$\operatorname{Re} \bar{W}_{\Gamma} = \operatorname{Re} W_{\Gamma} / \operatorname{Re} W_{11}; \quad (5.65)$$

$$\operatorname{Im} \bar{W}_{\Gamma} = \operatorname{Im}(W_{\Gamma} + W_{11}) / \operatorname{Re} W_{11} \quad (5.66)$$

буде мати властивості діаграми Вольперта-Смітта, вписаної в це коло. В результаті на комплексній площині $W_{\text{вн},i}$ отримуємо коло \bar{W}_{Γ} , параметри якого нормовані. Таким чином, якщо перетворений імітанс, наприклад, варикапа або $p-i-n$ діода, в крайніх точках діапазону керування приймає значення $W_{1\Gamma}$ і $W_{2\Gamma}$, то, зробивши нормування вигляду (5.65) і (5.66), на діаграмі Вольперта-Смітта знаходимо дві точки \bar{W}_{Γ} і $\bar{W}_{2\Gamma}$, координати яких на комплексній площині відповідно дорівнюють: $\operatorname{Im} W_{\text{вн},\max,i}$; $\operatorname{Re} W_{\text{вн},\min,i}$; $\operatorname{Im} W_{\text{вн},\min,i}$; $\operatorname{Re} W_{\text{вн},\max,i}$. Підставляючи ці значення в (5.60), знаходимо значення інтегральної крутизни для реального КЕ.

Для потенційного КЕ, на основі розглянутого багатополосника, значення перетворених імітансів будуть відповідати критичним точкам (2, 3, 5, 8) на імітансному колі: $\bar{W}_{\Gamma}^{(2)}$; $\bar{W}_{\Gamma}^{(3)}$; $\bar{W}_{\Gamma}^{(5)}$; $\bar{W}_{\Gamma}^{(8)}$. Використовуючи формули денормування, що одержані з (5.65, 5.66), $\operatorname{Re} W_{\Gamma} = \operatorname{Re} \bar{W}_{\Gamma} \operatorname{Re} W_{11}$, $\operatorname{Im} W_{\Gamma} = \operatorname{Im} \bar{W}_{\Gamma} \operatorname{Re} W_{11} - \operatorname{Im} W_{11}$, знаходимо абсолютні значення цих параметрів, підставляючи які у (5.55, 5.56) розраховуємо значення інтегральної крутизни для потенційного КЕ. В результаті, використовуючи тільки графоаналітичні перетворення, шляхом орієнтації діаграми Вольперта-Смітта на комплексній площині з'являється можливість знаходження коефіцієнтів ефективності КЕ за кожним каналом перетворення імітансу. Зробивши аналогічні процедури для всіх каналів перетворення імітансу знаходимо результуючий коефіцієнт ефективності УПП_N, використовуваний при реалізації багатопараметричного КЕ.

Як приклад практичної реалізації розглянемо комбіновані КЕ, що використовують параметричні УПП_N на основі польового транзистора з варикапами як ємнісними перетворюваними імітансами (рис. 5.12).

Кожен КЕ в результаті декомпозиції подається у вигляді двох схем, утворених однопараметричним УПП і варикапом. В табл. 5.5 подані результати розрахунку коефіцієнтів ефективності таких КЕ, проведені з використанням виразів (5.51–5.64).

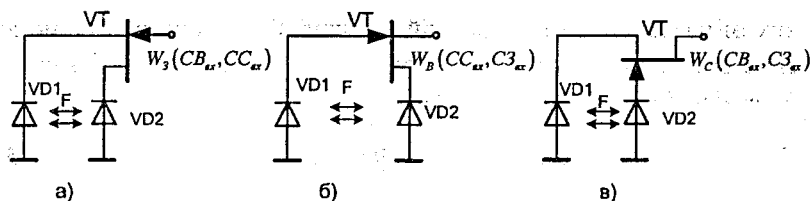


Рисунок 5.12 – Високочастотні схеми комбінованих КЕ на основі варикапів і двопараметричних УПН на основі польового транзистора

Таблиця 5.5 – Коефіцієнти ефективності комбінованих КЕ на основі УПН

Параметри	СВвх	ССвх	ССвх	СЗвх	СЗвх	СВвх
$\rho \text{ Ом}^{-1}$	0,07	0,012	0,072	$3,206 \cdot 10^{-4}$	$2,333 \cdot 10^{-4}$	0,028
B_{X_i}	0,622	0,711	0,391	1,622	18,402	0,583
B_{R_i}	0,913	0,907	0,907	0,873	0,873	0,913
K_{1i}	0,322	0,306	0,377	0,204	0,028	0,33
$S_{\text{хopt}}^R$	59,5	12	12	0,033	0,033	59,5
$S_{\text{хopt}}^X$	127,5	20,667	20,667	0,533	0,533	127,5
K_{2i}	0,989	0,947	0,947	0,021	0,021	0,989
K_{3i}	0,995	0,969	0,969	0,312	0,312	0,995
K_{4i}	$3,511 \cdot 10^{-3}$	0,076	0,012	$8,265 \cdot 10^{-3}$	$8,421 \cdot 10^{-3}$	$1,883 \cdot 10^{-3}$
K_{5i}	0,014	0,132	0,01	0,034	0,075	0,016
S_X^X	0,107	0,169	0,08	$1,181 \cdot 10^{-3}$	$2,137 \cdot 10^{-3}$	0,049
S_R^X	0,08	0,127	0,06	$8,851 \cdot 10^{-4}$	$1,602 \cdot 10^{-3}$	0,037
S_R^R	0,02	0,073	0,069	$2,123 \cdot 10^{-4}$	$1,802 \cdot 10^{-4}$	$4,245 \cdot 10^{-3}$
S_X^R	0,026	0,097	0,092	$2,832 \cdot 10^{-4}$	$2,404 \cdot 10^{-4}$	$5,663 \cdot 10^{-3}$
K_{6i}	0,068	0,107	0,051	$7,518 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,031
K_{7i}	0,051	0,08	0,038	$5,635 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	0,024
K_{8i}	0,013	0,046	0,044	$1,352 \cdot 10^{-4}$	$1,147 \cdot 10^{-4}$	$2,704 \cdot 10^{-3}$
K_{9i}	0,017	0,062	0,058	$1,803 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$3,605 \cdot 10^{-3}$
E_{R_i}	0,145	0,30	0,24	0,023	0,01	0,023
E_{X_i}	0,25	0,37	0,23	0,21	0,13	0,21
Ξ_i	0,19	0,33	0,24	0,07	0,04	0,07
E_R		0,2		0,14		0,015
E_X		0,25		0,17		0,165
E		0,25		0,16		0,05
Вид КЕ	Рис. 5.12а		Рис. 5.12б		Рис. 5.12в	

Аналіз коефіцієнтів ефективності КЕ, поданих в табл. 5.5, показує, що найкращі параметри має варіант перетворення ємнісного імпедансу варикапа VD_1 в імпеданс $W_{\text{внх}} = W_3$ в схемі ССвх ($E_{R_i} = 0,3$; $E_{X_i} = 0,37$; $E_i = 0,33$). Це визначило істотну перевагу КЕ (рис. 5.12, а) порівняно з іншими варіантами комбінованих КЕ. З табл. 5.5 видно важливу перевагу таких комбінованих КЕ – потенційна можливість суттєвого підвищення крутизни керування. Наприклад, для схем СВвх і ССвх маємо $S_{X_{opt}}^X = 127,5$ од, що є перспективою підвищення не тільки

діапазону керування; але і чутливості перетворюваного імітансу первинних вимірювальних перетворювачів.

Розрахунок ефективності керованих комбінаційних елементів на основі узагальнених перетворювачів імітансу можливий за допомогою розроблених комп'ютерних програм «Алгоритм ефективності узагальнених перетворювачів імітансу» та «Ефективність керованих комбінаційних елементів на основі однокристалного узагальненого перетворювача імітансу» [24, 25].

Контрольні запитання та вправи

1. Дайте означення однопараметричного та багатопараметричного УПІ. В чому їх характерна відмінність?
2. Що таке «Канал перетворення імітансу»? З якою метою використовується це поняття?
3. За яких умов УПІ має властивості конвертора або інвертора імітансу?
4. Якими основними робочими параметрами характеризується УПІ?
5. Якими ККД прийнято характеризувати УПІ? В якому діапазоні значень вони можуть змінюватися?
6. З яких частин складається комбінованих КЕ і яка роль кожної його частини?
7. Які вводяться обмеження при розробці критеріїв ефективності комбінованих КЕ на основі УПІ?
8. Як залежить ефективність комбінованого КЕ від значення інваріантного коефіцієнта стійкості ПІ та радіуса його імітансного кола?
9. В чому перевага графоаналітичного методу оцінювання ефективності комбінованого КЕ на основі УПІ порівняно з аналітичним?

6 МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ І ЯКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

6.1 Поняття про інформаційні середовища розробки та виробництва промислової продукції

Великий вплив на розробку, виготовлення та експлуатацію промислової продукції здійснюють так звані CALS-технології. Це англomовне скорочення, повна назва якого – Continuous Acquisition and Lifecycle Support, що означає «постійне отримання даних та підтримка життєвого циклу виробів». В Росії CALS-технологіям відповідають ІПВ-технології (інформаційна підтримка виробів).

Головне завдання створення та впровадження CALS-технологій – забезпечення уніфікованого опису та тлумачення даних, незалежно від місця та часу їх одержання в загальному комп'ютерному середовищі. При цьому одна і та ж документація може бути використана багаторазово в різних проектах, а технологічна документація адаптована до різних виробничих умов, що дозволяє суттєво скоротити та здешевити увесь цикл проектування та виробництва.

CALS-технології виникли в 80-ті роки у США в зв'язку з роботами за тематикою стратегічної оборонної ініціативи (COI), коли було необхідно об'єднати для виконання загальнонаціонального проекту багато великих приватних корпорацій. Однак пізніше з'ясувалось, що створення єдиного інформаційного середовища взаємодії необхідно не тільки для унікальних програм типу COI, а і для виробництва складних систем взагалі.

В 90-х роках минулого століття розроблені та прийняті серії міжнародних стандартів з CALS-технологій, серед яких головним є комплекс стандартів ISO-10303 STEP (Standard for Exchange of Product Data).

Оскільки унікальні програми з розробки складних загальнодержавних проектів виконувалися і в СРСР, то відповідна уніфікація виробничої документації була ще раніше проведена в межах впровадження системи ЄСКД – єдиної системи конструкторської документації.

Крім того, уніфікації процесу розробки та створення промислової продукції сприяла система загальнодержавних стандартів, основним з яких був ГОСТ 15.001-73 «Разработка и постановка продукции на производство». В 1988 році був введений ГОСТ 15.001-88 «Продукция производственно-технического назначения», в якому вимоги до оформлення документації значно пом'якшені і основну увагу перенесено на домовленості між замовником та виробником продукції.

В 1984 році введений в дію ГОСТ 2.116-84 «Карта технического уровня и качества продукции», який був актуалізований в 2009 році і зараз діє на території Росії. В розвиток цього ГОСТу Державним комітетом СРСР з науки та техніки постановою № 12 від 21.01.87 та Державним комітетом з

обчислювальної техніки та інформатики постановою № 20 від 08.09.88 були введені в дію «Единая методика оценки технического уровня продукции машиностроения (временная)» і «Временная методика оценки технического уровня и качества средств вычислительной техники общего назначения».

6.2 Нормативні документи з оцінювання технічного рівня та якості промислових виробів

Одним з нормативних документів з оцінювання технічного рівня та якості є Єдина методика оцінювання технічного рівня продукції.

Технічний рівень продукції – це сукупність властивостей конкретного виробу, яка складається з показників функціонального призначення, суспільно корисного ефекту, рівня усіх видів витрат, а також споживчих і екологічних характеристик.

Технічний рівень визначається на основі зіставлення значень показників зразка, що оцінюється, які характеризують вказану сукупність властивостей, у порівнянні з відповідними показниками конкретних аналогів, або їх прогнозованих значень, що відображають найвищі світові досягнення та тенденції їх розвитку. Взяті для порівняння аналоги повинні мати те ж призначення та галузь застосування, що і оцінюваний пристрій.

На етапі проектування від технічного завдання до робочого проекту значення показників найвищого світового рівня прогнозуються на момент початку виробництва. На етапі постановки на виробництво та серійного випуску значення показників визначаються за результатами випробування зразків, які можна зіставити за часом початку виробництва. Можливе відхилення зіставлення за часом – один рік, а для унікальної продукції з довгим циклом створення – до двох років. Кількість аналогів повинна бути не менше двох.

Основним документом з вибору номенклатури показників продукції, що оцінюється, є карта технічного рівня та якості продукції згідно з ГОСТ 2.116-84.

Номенклатура показників складається з декількох груп.

Основні показники технічного рівня.

1. Показники призначення (продуктивність, потужність, точність, швидкодія).
2. Показники надійності та довготривалості роботи (напрацювання на відмову, ресурс, час служби).
3. Відносні показники (енергоспоживання, матеріалоємність).
4. Експлуатаційні показники (ремонтоспроможність, час збереження основних показників).
5. Показники екологічності.
6. Показники безпеки.

Додаткові показники технічного рівня.

1. Показники рівня автоматизації.
2. Ергономічні показники.
3. Показники рівня стандартизації та ін.

Номенклатура показників вибирається однаковою за продукцією, що оцінюється, та її аналогами з урахуванням специфіки функціонального призначення.

Власне оцінювання технічного рівня продукції виконується за два етапи: експертний та розрахунковий. Експертний етап передбачає порівняння значень основних показників технічного рівня виробу, що оцінюється, та вибраних аналогів.

Технічний рівень виробу, що оцінюється

– вище світового рівня, якщо кожне зі значень, вибраних для зіставлення показників, на 5 % і більше відповідного значення показників кожного аналогу;

– відповідає світовому рівню, якщо відхилення значень параметрів зразка, що оцінюється, знаходяться в межах 3 %;

– не відповідає світовому рівню, якщо відхилення у гіршу сторону більше 3 %.

Розрахунковий етап оцінювання технічного рівня виконується тоді, коли деякі параметри зразка, що оцінюється, перевищують параметри аналогів, а інші – нижчі відповідних параметрів аналогів, що на експертному етапі не дозволяє зробити певний висновок.

Розрахунок виконується за відносними показниками зіставлення, які у подальшому будемо називати нормованими параметрами:

$$q_i = \frac{p_i}{p_{ia}} \quad (6.1)$$

де p_i – абсолютне значення i -того показника виробу, що оцінюється;

p_{ia} – абсолютне значення i -того показника аналога;

$i = 1, 2, \dots, n$; n – кількість оцінних показників, що включають основні та додаткові показники.

Якщо з підвищенням величини показника якості виробу погіршується, то для нормування застосовується формула

$$q_i = \frac{p_{ia}}{p_i} \quad (6.2)$$

Узагальнений показник ступеня відповідності зразка, що оцінюється, найвищим світовим досягненням (оцінювання технічного рівня) розраховується відповідно до адитивної цільової функції

$$K_{\text{тв}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n q_i \quad (6.3)$$

При цьому $K_{\text{ТУ}}$ може бути менше одиниці (технічний рівень зразка не відповідає світовому рівню), дорівнювати або бути більшим одиниці (технічний рівень зразка відповідає або перевищує світовий рівень).

Якщо необхідно визначити відносне здешевлення нової техніки, то виконується розрахунок узагальненого показника економічної ефективності K_E за формулою

$$K_E = \frac{(C_{\text{НТ}} + K_{\text{НТ}} \cdot E) \cdot K_{\text{ТУ.НТ}}}{(C_{\text{ПР}} + K_{\text{ПР}} \cdot E) \cdot K_{\text{ТУ.ПР}}}, \quad (6.4)$$

де $C_{\text{ПР}}$ – собівартість продукції, що виробляється;

$C_{\text{НТ}}$ – собівартість зразків нової техніки, що оцінюється;

$K_{\text{ТУ.НТ}}$ – узагальнений показник технічного рівня зразка нової техніки, що повинна оцінюватися;

$K_{\text{ТУ.ПР}}$ – узагальнений показник технічного рівня прототипу, що випускається вітчизняною промисловістю, розрахований за показниками аналогу, який вибраний для зразка, що оцінюється;

$K_{\text{ПР}}$ – нормовані капітальні вкладення у виробничі фонди для випуску прототипу;

$K_{\text{НТ}}$ – нормовані капітальні вкладення у виробничі фонди, що необхідні для випуску нового зразка;

E – нормований коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Показник економічної ефективності зразка нової техніки оцінюється в залежності від значень відхилення K_E від одиниці в більшому або меншому напрямку.

На базі оцінювання технічного рівня продукції розробляються та впроваджуються заходи з доведення технічного рівня до найвищих світових досягнень з урахуванням господарської ефективності.

Оцінювання технічного рівня виконується підприємствами та організаціями-розробниками, виготовлювачами та основними замовниками. Головний (генеральний) конструктор персонально відповідає за вибір аналогів для порівняння, достовірність даних за результатами випробовувань зразкової продукції та аналогів, а також за встановлення прогнозованих значень технічних параметрів.

Тимчасова методика оцінювання технічного рівня і якості засобів обчислювальної техніки загального призначення відрізняється від Єдиної методики деякими особливостями.

Показники технічного рівня і якості розділені на чотири групи. В кожній групі визначається базовий показник для нормування показників цієї групи відповідно до (6.1) або (6.2). Комплекс базових показників може на-

лежати гіпотетичному зразку, який має збалансовану сукупність показників, що можуть бути досягнуті реально.

Для кожної групи розраховується узагальнена оцінка показників, кожен з яких може бути ранжований з однаковою вагою, або з вагою, яка є ступенем 2. Значення узагальненого показника технічного рівня і якості розраховується за формулою

$$K_y = 0,25 \cdot [K_y(D) + K_y(A)] + 0,5 \cdot K_y(B), \quad (6.5)$$

де $K_y(B)$, $K_y(A)$, $K_y(D)$ – узагальнена оцінка показників за групами:

- основних функціонально-технічних характеристик (B);
- інших функціонально-технічних та споживчих властивостей (A);
- конструктивно-технологічних характеристик (D).

Технічний рівень і якість вважаються поняттями еквівалентними та визначаються для кожної конкретної моделі відносно свого базового зразка або базових показників.

Кожне оцінювання технічного рівня і якості складається з об'єктивних та суб'єктивних моментів. У наведених методиках суб'єктивні моменти є на всіх трьох етапах:

- базовий зразок вибирається головним інститутом галузі або головним конструктором;
- вагові коефіцієнти призначаються експертами;
- нормувальні та цільові функції також вибираються суб'єктивно.

Об'єктивними величинами є лише значення показників зразків, що оцінюються, та аналогів. Динаміка науково-технічного прогресу враховується тільки через суб'єктивний вибір базового зразка або показників.

6.3 Системний рівень проектування електронних пристроїв

Системний рівень проектування електронних пристроїв розглянемо на прикладі інтегральних схем аналого-цифрових перетворювачів.

Системний рівень є найбільш загальним рівнем опису і проектування аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). На цьому рівні АЦП характеризується деяким мінімальним складом системних параметрів, який дозволяє спроектувати систему в цілому. Кількість системних параметрів для АЦП досягає десяти та рекомендована ДСТУ 3636-98 (ГОСТ 30606-98).

В технічному завданні на розробку перетворювача перш за все враховуються вимоги до його параметрів з боку систем, де він буде використовуватися. До початку розробки оцінюється існуючий технічний рівень перетворювальної техніки, який найбільш повно характеризується таблицею зі системними параметрами всіх перетворювачів, що виробляються промисловістю. В нормативних методиках з цієї таблиці вибираються декілька аналогів.

Якщо готового перетворювача з потрібними системними параметрами немає, то розробляється новий перетворювач. Перетворювачі розробляються та виготовляються в декількох великих організаціях, які фактично складають окрему галузь промисловості. Значні економічні витрати на розробку і виготовлення нових перетворювачів виправдані тільки в разі великого об'єму їх випуску, який може бути забезпечений, якщо ними комплектуються системи, призначені для розв'язання нової масової задачі, або якщо модернізуються існуючі системи.

Чим більше буде систем, де можна використати розроблений перетворювач, тим більший може бути об'єм його випуску та тим вище буде економічна ефективність його розробки.

В даному розділі задача про заміну найбільшої кількості перетворювачів, що виробляються, вирішується за допомогою аналізу двох показників перетворювачів за сукупністю параметрів: інтегральної якості та ступеня спеціалізації.

В існуючих нормативних документах оцінка інтегральної якості є функцією від одиничних показників якості продукції. Також існує методика оцінювання інтегральної якості, яка дозволяє більш об'єктивно оцінювати цю величину для пристрою, який проектується, відносно всієї сукупності перетворювачів, що виробляються. Природно, інтегральна якість пристроїв, які розробляються, повинна бути вищою, ніж цей же показник для вже існуючих пристроїв. Використовується числова шкала для оцінювання ступеня спеціалізації. Перетворювачі з мінімальною оцінкою відносять до групи загального застосування, а з максимальною – до групи спеціалізованих пристроїв. Перетворювачі загального застосування на одиницю поліпшення інтегральної якості можуть замінити найбільшу кількість пристроїв, що вже виробляються.

6.4 Методика оцінювання інтегральної якості

Можна оцінювати інтегральну якість за об'єктивним критерієм, який визначається шляхом аналізу роботи більш складної системи, в якій використовується пристрій, що оцінюється [3].

Зважаючи на те, що АЦП є функціонально автономними пристроями та можуть бути використані в різних аналого-цифрових системах, які невідомі на етапі розробки перетворювача, то подібний підхід зустрічається з певними труднощами. Крім того, таке оцінювання інтегральної якості залежить від системи, де перетворювач використовується, тобто вона буде багатозначною.

6.4.1 Формулювання задачі

Промисловість розвинених в технічному відношенні країн виробляє ряди інтегральних схем АЦП з великими діапазонами значень параметрів. Параметри перетворювачів взаємозалежні і конкурентні, тобто вони не яв-

ляють собою ортогональної системи. Наприклад, зменшення похибки майже завжди призводить до збільшення часу перетворення, зменшення часу перетворення – до збільшення споживаної потужності та таке інше.

Цей об'єктивно існуючий взаємозв'язок між параметрами перетворювачів і повинен бути відображений у виразах для оцінювання інтегральної якості.

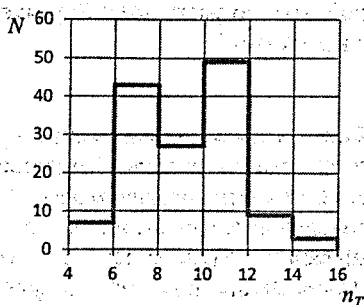
В методиці оцінювання інтегральної якості іменовані параметри нормуються, а потім об'єднуються для формування цільової функції, у відповідності до якої і виконується оцінювання інтегральної якості [26, 27]. Вибір нормувальних та цільових функцій здійснюється за кількісним критерієм і пов'язаний з апроксимацією області існування даного класу пристроїв у просторі їх параметрів.

Основними параметрами АЦП, які визначають їх якість, є: точність (n_T – кількість еквівалентних похибки двійкових розрядів); швидкодія (F – частота одержання відліків, або $t_{пер}$ – час перетворення); споживана потужність (P). Як база даних про існуючі перетворювачі використовується таблиця з параметрами ІС АЦП.

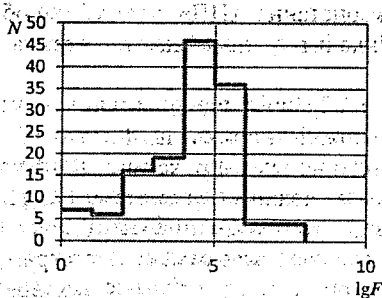
Оцінимо інтегральну якість перетворювачів за двома найважливішими інформаційними параметрами: n_T та F . На рис. 6.1 в координатах n_T та $\lg F$ нанесена область існування перетворювачів.



Рисунок 6.1 – Область існування ІС АЦП



а)



б)

Рисунок 6.2 – Розподілення кількості моделей АЦП
а) за точністю, б) за швидкодією

Таблиця 6.1 – Параметри
граничних АЦП

Номер п/п	n_T , біт	$t_{\text{пер}}$, мкс
1	5	0,033
2	6	0,033
3	7	0,02
4	8	0,033
5	9	1
6	10	0,8
7	11	2
8	12	2
9	13	60
10	14	50
11	15	50
12	16	250000

Область може бути визначена її границею найкращих пристроїв та двома розподіленнями – за точністю (рис. 6.2, а) та частотою одержання відліків (рис. 6.2, б). Якщо наявні дані про кількість вироблених пристроїв кожної моделі, можна використати розподілення кількості перетворювачів за відповідними параметрами.

Зазвичай розробляються перетворювачі з параметрами, які повинні бути кращими, ніж у існуючих пристроїв, тому розглянемо ділянку границі області існування, яку формують АЦП з найбільшими значеннями частоти одержання відліків для усіх значень n_T – від 5 до 16. У подальшому ця ділянка буде мати назву – границя, а перетворювачі, які її створюють, – граничні АЦП.

Параметри граничних АЦП наведені в табл. 6.1. Згладжена апроксимуючими кривими ділянка границі є границею Парето. Природно припустити, що кожен граничний перетворювач спроектувати і виготовити однаково важко. Тому всі граничні АЦП повинні мати однакову та найкращу оцінку інтегральної якості. Для одержання такої оцінки кладемо рівняння границі, а потім перенесемо вільний член у в ліву частину рівняння. Вираз, який залишився справа, і буде цільовою функцією, відповідно до якого може виконуватися оцінювання інтегральної якості.

Форми розподілень (гістограм) кількості перетворювачів за їх параметрами відображають важливі особливості етапів «розробка – виготовлення –

використання АЦП», і тому їх необхідно брати до уваги, коли формується оцінка інтегральної якості, зокрема, при нормуванні.

6.4.2 Вибір нормувальної функції

Кожній нормувальній функції необхідно ставити у відповідність розподілення, яке апроксимує гістограму розподілення кількості перетворювачів за кожним параметром, наприклад, за точністю та швидкістю. Тоді кращій нормувальній функції буде відповідати апроксимуюче розподілення, яке наближає реальну гістограму найкращим чином за певним критерієм. Крім того, для збереження відношень переваги нормувальна функція повинна монотонно збільшуватися або зменшуватися [28]. Розглянемо декілька типів нормувальних функцій.

Відома функція вигляду

$$Z_{ji} = \frac{p_{ji} - p_{j\min}}{p_{j\max} - p_{j\min}}, \quad (6.6)$$

де p_{ji} – j -й параметр пристрою, що оцінюється,

$p_{j\max}$, $p_{j\min}$ – найбільше (найкраще) та найменше (найгірше) значення параметрів з області існування пристроїв.

Нормувальній функції (6.6) відповідає рівномірне розподілення, рівняння якого наведено нижче

$$f_p(p_{ji}) = \begin{cases} 0, & \text{при } p_{j\max} < p_j < p_{j\min} \\ \frac{M}{i_\Sigma}, & \text{при } p_{j\min} < p_j < p_{j\max} \end{cases}, \quad (6.7)$$

де M – загальна кількість моделей АЦП,

i_Σ – кількість інтервалів гістограм.

В табл. 6.2 та табл. 6.3 наведено значення параметрів та кількість моделей для значення цих параметрів для апроксимуючих рівномірних, нормальних розподілень та розподілень Джонсона. Наведено також похибки наближення у вигляді

$$\delta\chi^2 = \frac{\chi^2}{M}, \quad (6.8)$$

де χ^2 – відомий за статистикою критерій Пірсона.

Рівномірне розподілення, яке характеризується першим моментом (середнє значення), наближає гістограми не кращим чином. Найбільш важливими та усталеними характеристиками розподілень є їх перші моменти, потім другі, треті та четверті. Тому для підвищення точності апроксимації

доцільно використовувати розподілення та, відповідно, нормувальні функції, які мають у складі перші та другі, а потім треті та четверті моменти.

Таблиця 6.2 – Розподілення ІС АЦП за n_T та апроксимуючі розподілення

n_T , біт	Частота в інтервалах			
	$N_{\text{екс}}$	$N_{\text{равн.}}$	$N_{\text{норм.}}$	$N_{\text{Джонс.}}$
6	8	24	9	6
8	45	24	31	37
10	27	24	50	55
12	53	24	39	38
14	9	24	14	10
16	3	24	2	0
Похибка		0,78	0,167	0,158

Таблиця 6.3 – Розподілення ІС АЦП за $\lg F$ та апроксимуючі розподілення

$\lg F$	Частота в інтервалах			
	$N_{\text{екс}}$	$N_{\text{равн.}}$	$N_{\text{норм.}}$	$N_{\text{Джонс.}}$
1	9	18	4	1
2	12	18	13	12
3	13	18	28	29
4	30	18	38	40
5	47	18	34	36
6	30	18	19	21
7	0	18	7	5
8	4	18	2	1
Похибка		0,682	0,251	0,166

Розглянемо нормувальну функцію вигляду

$$Z_{ji} = \frac{P_{ji} - \overline{P_j}}{S_{pj}} \quad (6.9)$$

де Z_{ji} – нормований j -ий параметр i -го АЦП;

P_{ji} – значення j -го параметра i -го АЦП;

$\overline{P_j}$ – емпіричне середнє (перший момент) j -го параметра;

S_{pj} – оцінка середньоквадратичного ухилення (другий момент) j -го параметра.

Розподілення Z_j нормоване ($Z_j = 0, S_p = 1$) та нормальне.

Нормувальна функція вигляду (6.9) відповідає апроксимуючому гістограму нормальному розподіленню, яке має вигляд

$$f_n(p_{ji}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_{pj}} \exp \left[-\frac{(p_{ji} - \bar{p}_j)^2}{2S_{pj}^2} \right]. \quad (6.10)$$

Для гістограм (рис. 6.2) перші та другі моменти дорівнюють: $p_n = 10,3$; $S_{pn} = 2,29$; $p_F = 4,23$; $S_{pF} = 1,53$. Похибки наближення, які є в табл. 6.2 і табл. 6.3, значно зменшилися у порівнянні з рівномірною апроксимацією.

Область існування АЦП з нормованими відповідно до (6.9) параметрами, наведена на рис. 6.3.

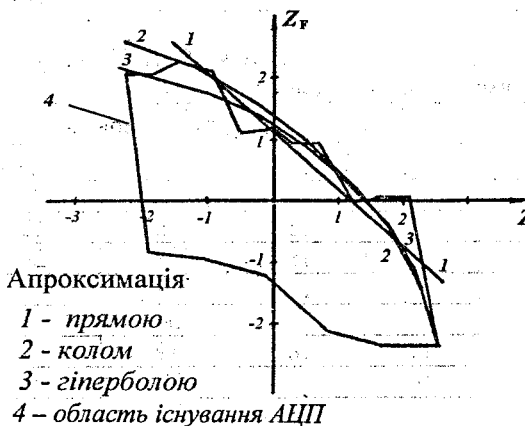


Рисунок 6.3 – Апроксимація границі області існування ІС АЦП за нормальної нормувальної функції

Для зменшення похибки наближення необхідно апроксимувати гістограми деякими іншими стандартними розподіленнями, які враховували би треті та четверті моменти. Методи вибору форми та параметрів наближених розподілень відомі.

Розглянемо перетворення Джонсона як нормувальну функцію S_B

$$Z_{ji} = \gamma_j + \eta_j \cdot \ln \frac{p_{ji} - \epsilon_j}{\epsilon_j + \lambda_j - p_{ji}}, \quad (6.11)$$

де ϵ_j та $\epsilon_j + \lambda_j$ – нижня та верхня межа змін p_j ;
 γ_j, η_j – коефіцієнти зміщення та масштабний для j -го параметра.

Коефіцієнти γ_j та η_j визначаються через третій та четвертий моменти; величина Z_{ji} нормована та розподілена за нормальним законом.

Функції вигляду (6.11) відповідає апроксимуюче S_B розподілення Джонсона

$$f_D(p_{ji}) = \frac{\eta_j}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\lambda_j}{(p_{ji} - \varepsilon_j) \cdot (\lambda_j + \varepsilon_j - p_{ji})} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\gamma_j + \eta_j \cdot \ln \left(\frac{p_{ji} - \varepsilon_j}{\varepsilon_j + \lambda_j - p_{ji}} \right) \right]^2 \right\}. \quad (6.12)$$

Для гістограм з рис. 6.2 коефіцієнти дорівнюють

$$\begin{aligned} \varepsilon_n &= 4; \quad \varepsilon_n + \lambda_n = 16; \quad \gamma_n = 0,2; \quad \eta_n = 1,5; \\ \varepsilon_F &= 0; \quad \varepsilon_F + \lambda_F = 8,5; \quad \gamma_F = 0; \quad \eta_F = 1,5; \end{aligned}$$

Область існування для АЦП з нормованими за (6.11) параметрами зображена на рис. 6.4.

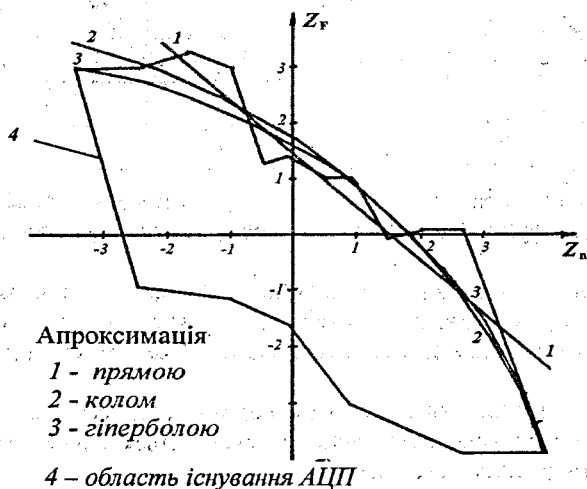


Рисунок 6.4 – Апроксимація границі області існування ІС АЦП за нормувальною функцією Джонсона

Похибки наближення гістограм функціями (6.12), як це впливає з табл. 6.2, найменші.

Для порівняння нормувальних функцій, які наведені в (6.6), (6.9), (6.11); вони зведені до одного діапазону за формулами:

$$Z_p = Z_{ijp} - 0,5, \quad (6.13)$$

$$Z_H = Z_{ijH} \cdot \frac{1}{Z_{H \max} - Z_{H \min}}, \quad (6.14)$$

$$Z_D = Z_{ijD} \cdot \frac{1}{Z_{D \max} - Z_{D \min}}, \quad (6.15)$$

де $Z_{H \max}$, $Z_{H \min}$, $Z_{D \max}$, $Z_{D \min}$ - це максимальні та мінімальні значення параметрів, нормованих за формулами (6.9), (6.11), (6.12).

За формулами (6.13) – (6.15) побудовані графіки нормувальних функцій для n_T (рис. 6.5) та $\lg F$ (рис. 6.6). На графіках $Z_p = Z1$, $Z_H = Z2$, $Z_D = Z3$.

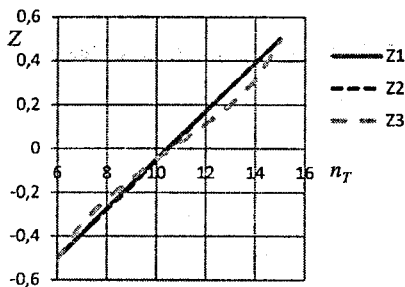


Рисунок 6.5 – Графіки нормувальних функцій для n_T

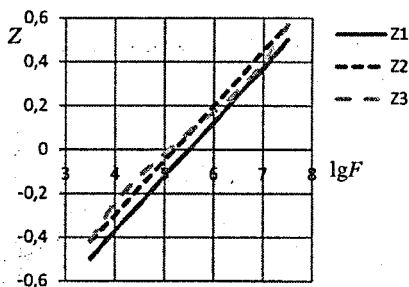


Рисунок 6.6 – Графіки нормувальних функцій для $\lg F$

Нормувальна функція вигляду (6.14) лінійна, але зміщена на рис. 6.6 вище відносно функції вигляду (6.13), що можна пояснити зміщенням значення емпіричного середнього наліво відносно середнього значення діапазону.

Нормувальна функція вигляду (6.15) нелінійна та перетинає нормувальну функцію (6.14) на рис. 6.5 у точці, що знаходиться нижче осі абсцис, а на рис. 6.6 – в точці вище осі абсцис.

Використання різних нормувальних функцій не змінює відношень переваги за кожним параметром окремо, але при об'єднанні у цільову функцію ці відношення змінюються, що буде проаналізовано під час розгляду цільових функцій.

6.4.3 Вибір цільової функції

Цільова функція визначає в просторі нормованих параметрів сімейство поверхонь (в двовимірному випадку – кривих), на кожній з яких знаходяться пристрої з однаковими оцінками інтегральної якості. Бажано як ці-

льову використовувати просту функцію. Однак границя області існування, як це впливає з рис. 6.1, є досить складною кривою:

Розглянемо ряд наближень границі, кожному з яких відповідає своя цільова функція. Найкращою є та цільова функція, якій відповідає крива, що апроксимує границю з найменшими похибками.

Точність наближення оцінимо за критерієм $\delta\chi^2$, що дозволяє порівнювати похибки нормувальних та цільових функцій. Числові значення $\delta\chi^2$ для різних цільових та нормувальних функцій наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Значення похибок $\delta\chi^2$ для різних нормувальних та цільових функцій

Апроксимація розподілень	Похибки апроксимації		
	F_n	F_o	F_r
Нормальна	0,261	0,15	0,142
Джонсона	0,219	0,139	0,135

Найпростішим наближенням є пряма лінія. Рівняння апроксимуючої прямої має вигляд

$$Z_{Fi} = kZ_{ni} + b. \quad (6.16)$$

Коефіцієнти k та b можна визначити за методом найменших квадратів з метою оптимального наближення границі прямою. На рис. 6.3 та рис. 6.4 апроксимуючі прямі зазначені цифрою 1, а величини коефіцієнтів для нормувальної нормальної функції дорівнюють: $k_n = -0,96$; $b_n = 1,2$; а для нормувальної функції Джонсона – $k_D = -0,986$; $b_D = 1,525$.

Цільова функція, що відповідає апроксимації границі прямою, є такою

$$Z_L = Z_{Fi} - kZ_{ni}. \quad (6.17)$$

Точність наближення границі лінією досить низька і тому для її підвищення використаємо більш складні функції, наприклад, криві другого порядку.

Розглянемо апроксимацію границі колом та гіперболою. Рівняння апроксимуючого кола має вигляд

$$Z_{Fi} = \sqrt{R^2 - (Z_{ni} + a)^2} - b. \quad (6.18)$$

Постійні коефіцієнти R , a , b визначаються за методом найменших квадратів або підбираються з метою одержання оптимального, у сенсі мінімуму $\delta\chi^2$, наближення.

На рис. 6.3 та рис. 6.4 апроксимуючі кола означені цифрою 2. Постійні коефіцієнти відповідно дорівнюють: $R_n = 6,7$; $a_n = b_n = 4$; $R_D = 11,25$; $a_D = 6,75$; $b_D = 7,25$.

Для наближення колом доцільно вибрати таку цільову функцію, вираз для котрої еквівалентний визначенню радіусу кола

$$F_0 = \sqrt{(Z_{Fi} + b)^2 + (Z_{ni} + a)^2}. \quad (6.19)$$

За такою цільовою функцією у найкращого перетворювача буде найбільша за величиною оцінка.

Рівняння апроксимуючої границі гіперболи таке

$$Z_{Fi} = \frac{A}{Z_{ni} - a} + b. \quad (6.20)$$

Постійні коефіцієнти A , a , b визначаються таким же чином, як і в попередньому випадку, а стала A пов'язана з піввіссю гіперболи p відомим співвідношенням

$$p = \sqrt{2A}. \quad (6.21)$$

На рис. 6.3 і рис. 6.4 гіперболічне наближення означено цифрою 3, а постійні величини для них такі: $A_n = 9$; $a_n = 4$; $b_n = 3,57$; $p_n = 4,24$; $A_D = 25$; $a_D = 6,61$; $b_D = 5,46$; $p_D = 7,07$.

Як і в минулому випадку, доцільно вибрати цільову функцію, вираз для якої еквівалентний виразу для півосі гіперболи:

$$F_r = \sqrt{2(Z_{ni} - a)(Z_{Fi} - b)}. \quad (6.22)$$

Для цієї кривої кращому перетворювачу відповідає менша за величиною оцінка. Формально величини a та b визначають точку, в яку зміщується початок координат для апроксимуючої гіперболи. За своєю суттю це нормовані параметри найкращого перетворювача у вибраній нами системі оцінок. Точність цього перетворювача еквівалентна 16 двійковим розрядам, а час перетворення $t_{\text{пер}} = 5,2$ нс.

6.4.4 Вибір вагових коефіцієнтів

Наближено границю можливо зобразити за допомогою кусково-лінійної апроксимації. Таке наближення виконано так, що для кожної точки границі апроксимуючий відрізок проведений через попередню та наступну точки (див. рис. 6.1). Рівняння апроксимуючих відрізків має вигляд

$$Z_{Fi} = k_N \cdot Z_{ni} + b_N, \quad (6.23)$$

$$\text{де } k_N = \frac{Z_{F(N+1)} - Z_{F(N-1)}}{Z_{n(N+1)} - Z_{n(N-1)}},$$

$$b_N = k_N \cdot Z_{n(N-1)} + Z_{F(N-1)}.$$

Рівняння (6.23) відрізняється від рівняння (6.16) тим, що в ньому величини k_N і b_N залежать від N , тобто для перетворювачів з різними Z_{ni} та Z_{Fi} вони можуть бути різними. Значення k_N для різних N та різних нормувальних функцій наведені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Значення k_N для різних N

n_T	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Нормальне	0,16	0	-1,26	-1	-0,24	-0,29	-1,1	-1	0,06	-2,76
Джонсона	0,2	0	-1,87	-1,6	-0,27	-0,35	-1,1	-0,9	0,04	-2,03

Кусково-лінійному наближенню відповідає цільова функція

$$F_{кл} = Z_{Fi} - k_N \cdot Z_{ni}. \quad (6.24)$$

Таким чином, вибір вагових коефіцієнтів та вибір цільової функції по суті є операціями еквівалентними, тому що перша відповідає апроксимації границі на невеликій ділянці (поблизу N) лінійною функцією, а друга – апроксимації границі в цілому. За такого підходу для визначення вагового коефіцієнта k_N необхідно знати ділянку переходу границі пристроєм, що оцінюється, а не створювати групу експертів та визначати процедуру формування експертних оцінок.

6.4.5 Оцінювання якості перетворювачів за різними нормувальними та цільовими функціями

Відповідно до вибраного вирішального правила усі 12 граничних перетворювачів повинні мати найкращу та однакову оцінку інтегральної якості та в таблицях переваг займати перші 12 місць.

Оцінювання інтегральної якості перетворювачів показали (табл. 6.6) переваги для трьох цільових функцій, в кожній з яких нормування відбулося за виразами (6.9) та (6.11).

Перші 12 місць означені жирним курсивом. Чим більше таких номерів у стовпці та чим менші номери у інших позиціях, тим краще відповідає оцінка інтегральної якості сформульованому вище вирішальному правилу. З табл. 6.6 видно, що найкраще відповідає вирішальному правилу оцінювання з цільовою гіперболічною функцією та нормувальною функцією Джонсона.

Однак для оцінювання перетворювачів, які перевищують абсолютно найкращі пристрої за одним параметром, краще застосовувати цільову функцію для кола та нормувальну нормальну функцію. При цьому відпадає потреба перераховувати всі постійні коефіцієнти.

Таблиця 6.6 – Параметри граничних АЦП та їх місця в таблицях переваг

Параметри		Нормальне розподілення			Розподілення Джонсона		
n_T , біт	$t_{пр}$, мкс	F_L	F_O	F_T	F_L	F_O	F_T
5	0,033	51	26	11	63	25	7
6	0,033	37	21	5	29	11	4
7	0,02	23	8	2	7	2	1
8	0,033	15	5	3	3	3	2
9	1	26	30	38	27	29	28
10	0,8	17	17	15	17	16	14
11	2	10	13	14	13	14	15
12	2	2	3	6	4	5	8
13	60	16	15	20	16	19	23
14	50	4	2	4	2	4	5
15	50	1	1	1	1	1	3
16	250000	82	18	29	50	8	6

Табл. 6.6 є своєрідною експериментальною перевіркою правильності рекомендацій щодо вибору нормувальних та цільових функцій за критерієм мінімуму величини похибки $\delta\chi^2$.

6.5 Кількісне оцінювання ступеня спеціалізації

Засоби обчислювальної техніки за вирішуваними задачами, а також за застосуванням в різних галузях, поділяються на універсальні, або загального застосування, та спеціалізовані. Проміжне положення займають проблемно-орієнтовані засоби, які призначені для вирішення заздалегідь визначеного класу задач. Таким чином, засоби обчислювальної техніки фактично поділяються на спеціалізовані, напівспеціалізовані та неспеціалізовані, тобто їх класифікація виконана за ступенем спеціалізації.

В тому випадку, коли спеціалізовані засоби мають деяку якісну ознаку, якої не мають засоби загального застосування, підпорядкування пристроїв до певної групи не має ускладнень.

Однак в сучасних засобах обчислювальної техніки спеціалізація виявляє себе перш за все покращенням одних параметрів за рахунок інших, наприклад, велика швидкодія за малої кількості розрядів та простої системи команд, мале енергоспоживання за низької швидкодії та обмеженої ємністю пам'яті та т. п. В цьому випадку якісна класифікація потребує подаль-

шої розробки з метою оцінювання ступеня спеціалізації кількісно, як це запропоновано для оцінювання інтегральної якості у попередньому розділі.

Для оцінювання ступеня спеціалізації перетворювачів відносно всієї множини перетворювачів, що виробляються, використовується кількісна шкала. Ступінь спеціалізації визначається як розкид нормованих безрозмірних параметрів Z_{ji} від їх середнього значення I_{ci} , що відповідає виразу для середньоквадратичного відхилення

$$I_{st} = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{(Z_{1i} - I_{ci})^2 + (Z_{2i} - I_{ci})^2 + \dots + (Z_{ni} - I_{ci})^2}, \quad (6.25)$$

де n – кількість параметрів, що беруть участь в оцінюванні,

$$I_{ci} = \frac{1}{n} (Z_{1i} + Z_{2i} + \dots + Z_{ni}) - \text{їх середнє значення.}$$

Чим більший розкид нормованих параметрів Z_i від їх середнього значення, тим більше значення I_{si} . Найбільше значення відповідає максимально спеціалізованим перетворювачам. Спеціалізований швидкодіючий перетворювач має найбільший нормований параметр з швидкодії, а спеціалізований точний – найбільший нормований параметр з точності.

6.6 Перетворювачі загального застосування

Існують перетворювачі, в яких всі нормовані параметри однакові, тобто $Z_{1i} = Z_{2i} = \dots = Z_{ni} = I_{ci}$. Це перетворювачі загального застосування або універсальні. Якщо оцінювати перетворювачі тільки за точністю та швидкодією за виразами (6.11), (6.22) та (6.25), то параметри перетворювачів загального застосування наведені в табл. 6.7.

Якщо використати бази даних про більш сучасні інтегральні схеми АЦП, то методика залишиться такою ж, але параметри АЦП загального застосування можуть бути іншими.

Таблиця 6.7 – Параметри АЦП загального застосування

Найменування АЦП	Точність n_T , біт	Час перетворення, мкс
АЦП8	8	2000
АЦП10	10	100
АЦП12	12	5
АЦП13	13	1
АЦП14	14	0,2
АЦП15	15	0,05
АЦП16	16	0,01

Перші два зразки (АЦП8 та АЦП10) мають невелику оцінку інтегральної якості. Ці перетворювачі з такими або вищими параметрами виробля-

ються промисловістю. Третій зразок (АЦП12) має найвищу якість і також виробляється промисловістю.

Четвертий, п'ятий і шостий зразки (АЦП13, АЦП14, АЦП15) є перспективною у розвитку перетворювачів загального застосування. Сьомий зразок має такі параметри, які дозволять йому замінити всі перетворювачі, які зараз виробляються. Доведення технічної можливості або неможливості створення такого перетворювача має значний теоретичний і практичний інтерес.

Перетворювач загального застосування з найкращою якістю має визначну особливість: він може замінити найбільшу кількість перетворювачів, що вже випускаються. Це витікає з нормальності розподілень, нормованих за (6.9) та (6.11) параметрів. Підрахунок кількості пристроїв, які можуть замінити перетворювачі з найкращою інтегральною якістю дав результати, що наведені в табл. 6.8.

Якщо вважати, що кожен перетворювач використовується в системі, яка розв'язує тільки одну задачу, то виготовлення першого пристрою з табл. 6.8 дозволить розв'язувати 102 задачі, другого пристрою – 74 задачі і т.п.

Таким чином табл. 6.8 фактично рекомендує виробнику, які перетворювачі повинні вироблятися великою серією та в якій послідовності їх необхідно освоювати у виробництві.

Таблиця 6.8 – Параметри граничних АЦП

Точність n_T , біт	Час перетворення, мкс	Кількість замічних пристроїв
12	5	102
10	0,8	74
15	50	58
8	0,033	51
16	250000	4

Для двовимірного випадку існують три основні напрямки розробки перетворювачів: збільшення швидкодії спеціалізованих швидкодійчих перетворювачів, підвищення точності спеціалізованих точних перетворювачів, збільшення швидкодії та підвищення точності одночасно у перетворювачів загального застосування.

На рис. 6.7 схематично зображено область існування перетворювачів в просторі їх нормованих параметрів. Відповідні напрямки розробки означені стрілками 1, 2, 3.

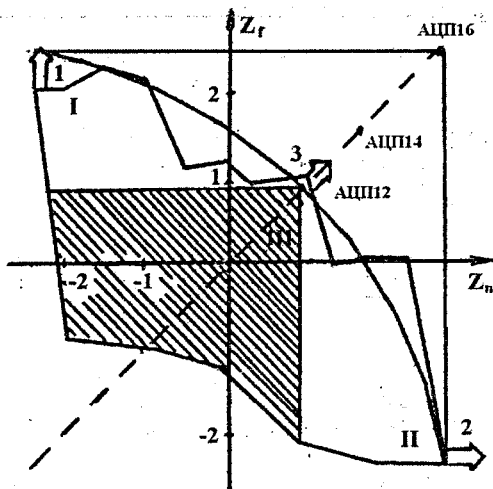


Рисунок 6.7 – Напрямки розробки АЦП

У напрямках 1,2 розробляються унікальні перетворювачі, які потребують вирішення складних проблем системного плану – зв'язків перетворювачів з джерелом вхідного сигналу та приймачем результатів перетворення в системах обробки сигналів. Економічний ефект може бути одержаний тільки після подолання цих труднощів, іноді через великий проміжок часу після виготовлення. Зазвичай такі перетворювачі виробляються за індивідуальними замовленнями. На рис. 6.7 напрямок розробки перетворювачів загального застосування (стрілка 3) знаходиться на прямій, яка проходить через початок координат під кутом 45° через перший квадрант.

6.7 Оцінювання технічного рівня та якості АЦП з урахуванням розсіюваної потужності

Для прикладу виконаємо оцінювання технічного рівня та якості ІС АЦП з урахуванням розсіюваної потужності Р.

Методика, якою послуговуються у двовимірному випадку, задовільно працює тільки в тому випадку, якщо область існування перетворювачів опукла. Однак гістограма розподілення кількості моделей АЦП в залежності від розсіюваної потужності, яка наведена на рис. 6.8, є двомодальною, тобто область існування АЦП у тривимірному просторі параметрів Z_n , Z_{lgF} , $Z_{lgPm/P}$ складається з двох об'ємів, що з'єднані перетинкою.

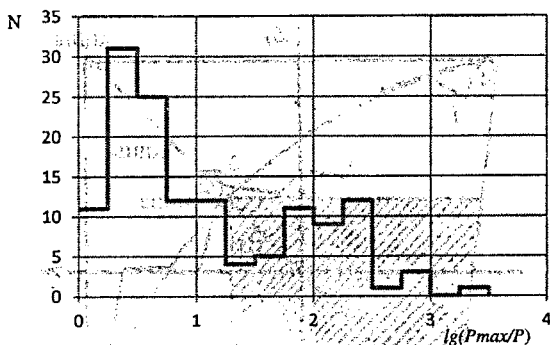


Рисунок 6.8 – Розподілення кількості ІС АЦП в залежності від розсіюваної потужності P

Один об'єм утворюють АЦП, що виготовлені за допомогою КМОН-технології, інший – АЦП, виготовлені за біполярною технологією. Тому вся область існування АЦП розділена відповідно до якісної ознаки – технології виготовлення – на два опуклих об'єми.

До біполярних АЦП належить 94 перетворювачі, параметри яких наведено в табл. 6.9. З цієї таблиці вибрані за критерієм Парето 20 граничних негірших перетворювачів, параметри яких наведені в табл. 6.10.

Таблиця 6.9 – Параметри біполярних ІС АЦП

Номер п/п	Тип	n (кіль. роз- рядів)	t_{np} , мкс	$P_{рас}$, МВт	$lg(F_i)$	$lg(P_{max}/P_i)$	Z_{pi}	$Z_{\bar{p}}$	Z_{Fi}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	TDC1021j	5	0,033	250	7,4815	1,16	-2,41	2,13	1,63
2	TDC10214j	6	0,033	1000	7,4815	0,56	-1,95	2,13	-0,08
3	ADC0800PC	6	50	255	4,3010	1,15	-1,95	-0,61	1,60
4	ADC0800P	6	80	255	4,0969	1,15	-1,95	-0,79	1,60
5	ADH81512-7	7	1	2700	6,0000	0,12	-1,50	0,85	-1,30
6	SDA5010	7	0,02	450	7,6990	0,90	-1,50	2,31	0,90
7	TDC1007j	8	0,033	2500	7,4815	0,16	-1,04	2,13	-1,21
8	TDC1001j	8	0,4	400	6,3979	0,95	-1,04	1,19	1,05
9	ADC815M	8	0,6	1250	6,2218	0,46	-1,04	1,04	-0,36
10	MN5101	8	0,9	1550	6,0458	0,37	-1,04	0,89	-0,62
11	TDC1002j	8	1	400	6,0000	0,95	-1,04	0,85	1,05
12	ZN433-8	8	1	500	6,0000	0,86	-1,04	0,85	0,77
13	ADC825M	8	1	1250	6,0000	0,46	-1,04	0,85	-0,36
14	ADH81512-8	8	1	2700	6,0000	0,12	-1,04	0,85	-1,30
15	HAS-0802	8	1,2	1800	5,9208	0,30	-1,04	0,78	-0,81
16	MN5100	8	1,5	1550	5,8239	0,37	-1,04	0,70	-0,62
17	ADC541	8	2,5	650	5,6021	0,74	-1,04	0,51	0,45
18	MN5140	8	2,5	915	5,6021	0,59	-1,04	0,51	0,03

Продовження таблиці 6.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19	MN5130	8	2,5	1000	5,6021	0,56	-1,04	0,51	-0,08
20	ADC82A	8	2,8	900	5,5528	0,60	-1,04	0,47	0,05
21	MN512	8	6	1000	5,2218	0,56	-1,04	0,18	-0,08
22	MN7100	8	7	1165	5,1549	0,49	-1,04	0,12	-0,27
23	MN509	8	12	720	4,9208	0,70	-1,04	-0,08	0,32
24	MN502	8	12	900	4,9208	0,60	-1,04	-0,08	0,05
25	ZN427	8	15	125	4,8239	1,46	-1,04	-0,16	2,48
26	NE5034	8	17	300	4,7696	1,08	-1,04	-0,21	1,40
27	ZN432	8	20	350	4,6990	1,01	-1,04	-0,27	1,21
28	AD570	8	40	175	4,3979	1,31	-1,04	-0,53	2,06
29	AD7583K	8	400	1000	3,3979	0,56	-1,04	-1,39	-0,08
30	MN20	8	2,5	1350	5,6021	0,43	-1,04	0,51	-0,45
31	ZN432	9	1	500	6,0000	0,86	-0,59	0,85	0,77
32	ZN432	9	20	350	4,6990	1,01	-0,59	-0,27	1,21
33	AD571j	9	30	300	4,5229	1,08	-0,59	-0,42	1,40
34	ADC816MC	10	0,8	3600	6,0969	0,00	-0,13	0,94	-1,66
35	ADC856C	10	1	500	6,0000	0,86	-0,13	0,85	0,77
36	ZN43310	10	1	500	6,0000	0,86	-0,13	0,85	0,77
37	MN5245	10	1	1500	6,0000	0,38	-0,13	0,85	-0,58
38	TDC1013j	10	1	800	6,0000	0,65	-0,13	0,85	0,19
39	HAS1002	10	1,4	1800	5,8539	0,30	-0,13	0,73	-0,81
40	ADC826M	10	1,4	3600	5,8539	0,00	-0,13	0,73	-1,66
41	MN524010	10	5	1400	5,3010	0,41	-0,13	0,25	-0,50
42	MNADC8410	10	8	1400	5,0969	0,41	-0,13	0,07	-0,50
43	ADC8410	10	10	1550	5,0000	0,37	-0,13	-0,01	-0,62
44	ADC85-10	10	10	1800	5,0000	0,30	-0,13	-0,01	-0,81
45	ZN432-10	10	20	350	4,6990	1,01	-0,13	-0,27	1,21
46	ADADC80-10	10	21	800	4,6778	0,65	-0,13	-0,29	0,19
47	AD571-K	10	30	300	4,5229	1,08	-0,13	-0,42	1,40
48	ADH8586-10	10	3	2175	5,5229	0,22	-0,13	0,44	-1,04
49	ADH8585-10	10	6	1575	5,2218	0,36	-0,13	0,18	-0,64
50	ADC1211	10	200	210	3,6990	1,23	-0,13	-1,13	1,84
51	ADH8516-11	11	2	2700	5,6990	0,12	0,32	0,59	-1,30
52	AD574j	11	30	780	4,5229	0,66	0,32	-0,42	0,22
53	AD570	11	50	725	4,3010	0,70	0,32	-0,61	0,31
54	ADC817M	12	2	1900	5,6990	0,28	0,78	0,59	-0,87
55	ADH851612	12	2	2700	5,6990	0,12	0,78	0,59	-1,30
56	HAS1202	12	2,2	1800	5,6576	0,30	0,78	0,56	-0,81
57	ADC827M	12	3	1900	5,5229	0,28	0,78	0,44	-0,87
58	ADH8586-12	12	5	2175	5,3010	0,22	0,78	0,25	-1,04
59	MN5240-12	12	5	1400	5,3010	0,41	0,78	0,25	-0,50
60	MNADC84-12	12	8	1400	5,0969	0,41	0,78	0,07	-0,50
61	ADC-HZ12-B	12	8	2000	5,0969	0,26	0,78	0,07	-0,94
62	ADC-HS12BM	12	9	2150	5,0458	0,22	0,78	0,03	-1,02
63	HDAS-8M	12	9	2845	5,0458	0,10	0,78	0,03	-1,37
64	ADC84-12	12	10	1550	5,0000	0,37	0,78	-0,01	-0,62
65	ADH-8585-12	12	10	1575	5,0000	0,36	0,78	-0,01	-0,64
66	ADC-85-12	12	10	1800	5,0000	0,30	0,78	-0,01	-0,81

Продовження таблиці 6.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
67	HI5712	12	10	2000	5,0000	0,26	0,78	-0,01	-0,94
68	MNADC87	12	10	1400	5,0000	0,41	0,78	-0,01	-0,50
69	MN521	12	13	745	4,8861	0,68	0,78	-0,11	0,28
70	ADC582	12	13	915	4,8861	0,59	0,78	-0,11	0,03
71	AD521	12	13	1000	4,8861	0,56	0,78	-0,11	-0,08
72	ADC581	12	20	725	4,6990	0,70	0,78	-0,27	0,31
73	ADC-HX-12-B	12	20	2000	4,6990	0,26	0,78	-0,27	-0,94
74	ADADC80-12	12	25	800	4,6021	0,65	0,78	-0,35	0,19
75	AD572	12	25	950	4,6021	0,58	0,78	-0,35	-0,02
76	ADC80-12	12	25	950	4,6021	0,58	0,78	-0,35	-0,02
77	MN5500	12	25	2100	4,6021	0,23	0,78	-0,35	-1,00
78	AD574	12	30	780	4,5229	0,66	0,78	-0,42	0,22
79	B7556	12	50	435	4,3010	0,92	0,78	-0,61	0,94
80	AD520	12	50	725	4,3010	0,70	0,78	-0,61	0,31
81	MN5203	12	50	745	4,3010	0,68	0,78	-0,61	0,28
82	AD5200	12	50	915	4,3010	0,59	0,78	-0,61	0,03
83	AD5203	12	50	1000	4,3010	0,56	0,78	-0,61	-0,08
84	ADC1210	12	200	210	3,6990	1,23	0,78	-1,13	1,84
85	MN5700	12	250	311	3,6021	1,06	0,78	-1,21	1,36
86	H5521	12	13	785	4,8861	0,66	0,78	-0,11	0,22
87	ICL8052	12	250000	360	0,6021	1,00	0,78	-3,79	1,18
88	MN5260	14	250	300	3,6021	1,08	1,69	-1,21	1,40
89	ADC713	13	60	1800	4,2218	0,30	1,24	-0,68	-0,81
90	ADC8068	14	250000	360	0,6021	1,00	1,69	-3,79	1,18
91	MN5280	14	100	1440	4,0000	0,40	1,69	-0,87	-0,53
92	ICL8052	16	250000	360	0,6021	1,00	2,60	-3,79	1,18
93	MN5282	14	50	1440	4,3010	0,40	1,69	-0,61	-0,53
94	ADC-71	15	50	1800	4,3010	0,30	2,15	-0,61	-0,81

На рис. 6.9, який одержаний за допомогою чисельного моделювання, наведена ізометрія граничної поверхні області існування біполярних АЦП в координатах, нормованих за (6.9) параметрів n_T , $\lg F$, $\lg(P_{\max}/P)$, що базується на даних з табл. 6.10. Область апроксимована трикутниками, кожній вершині якого відповідає модель АЦП.

Як цільова функція вибрана сфера. Параметри апроксимуючої поверхні граничних АЦП сфери, а саме, координати її центра та радіус можна визначити за методом найменших квадратів. Визначимо центр сфери у точці з координатами $Z_n = Z_{\lg F} = Z_{\lg P_{\max}/P} = -5$.

На рис. 6.10 зображено взаємне розташування граничної поверхні області існування біполярних АЦП та апроксимуючої сфери. Слід зазначити, що похибка апроксимації в цьому випадку, яка розраховується за критерієм $\delta\chi^2$, висока. Це видно візуально – область існування знаходиться значно вище апроксимуючої сфери, радіус R якої дорівнює 8,9.

Таблиця 6.10 – Граничні ІС АЦП за n_T , $\lg F$, $\lg P_{\max}/P$

Номер п/п	Z_n	Z_{Fi}	Z_{Pi}
1	-2,41	2,13	1,63
2	-1,5	2,31	0,9
3	-1,04	2,13	-1,21
4	-1,04	1,19	1,05
5	-1,04	-0,16	2,48
6	-0,13	0,94	-1,66
7	-0,13	0,85	0,77
8	-0,13	-0,27	1,21
9	-0,13	-0,42	1,40
10	0,78	0,59	-0,87
11	0,78	0,56	-0,81
12	0,78	0,25	-0,50
13	0,78	-0,11	0,28
14	0,78	-0,27	0,31
15	0,78	-0,61	0,94
16	0,78	-1,13	1,84
17	1,69	-1,21	1,40
18	1,69	-0,61	-0,53
19	2,15	-0,61	-0,81
20	2,6	-3,79	1,18

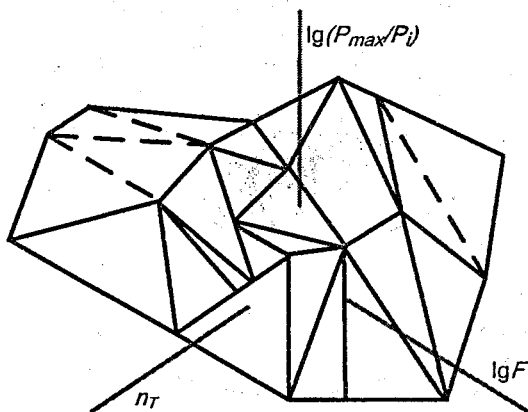


Рисунок 6.9 – Поверхня граничної області біполярних АЦП

Якщо вважати, що поверхня апроксимуючої сфери – це технічний рівень біполярних АЦП, або ж рівень «світового океану АЦП», то він знаходиться занадто низько. Гранична поверхня біполярних АЦП є «континентом», який розташований високо над рівнем «океану».

На рис. 6.11 радіус апроксимуючої сфери занадто великий і дорівнює 10,25. Над апроксимуючою сферою здійснюються тільки три «вершини» з найкращими АЦП. Похибка апроксимації також буде високою. Тобто технічний рівень, або ж рівень «світового океану», вибраний занадто високий.

На рис. 6.12 радіус апроксимуючої сфери дорівнює 9,62. Гранічна поверхня біполярних АЦП перетворилася на «архіпелаг». Найкращі АЦП виступають над поверхнею апроксимуючої сфери, а деякі не гірші АЦП зникли під поверхнею. Це і буде оптимальний радіус апроксимуючої сфери, тобто реальне значення технічного рівня біполярних АЦП.

6.8 Методика оцінювання технічного рівня, якості та ступеня спеціалізації

Алгоритм методики оцінювання технічного рівня, якості та ступеня спеціалізації такий.

1. Для всієї множини пристроїв, що виробляються на даний момент, будуються гістограми розподілень моделей пристроїв за кожним параметром.

2. Багатомодальні гістограми розподіляються на одномодальні за деякими якісними ознаками.

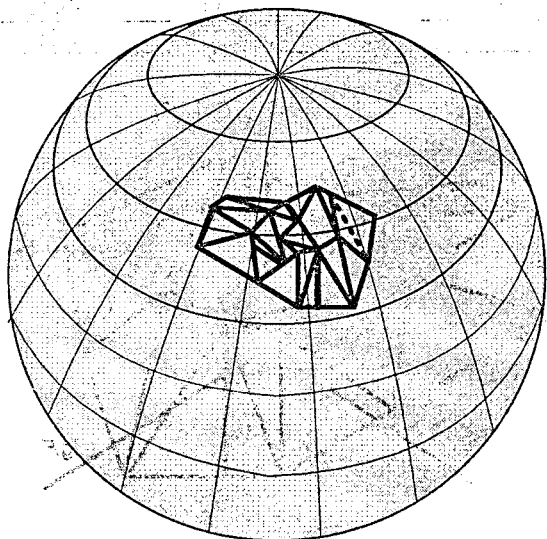


Рисунок 6.10 – Взаємне розташування граничної області та апроксимуючої сфери з малим R

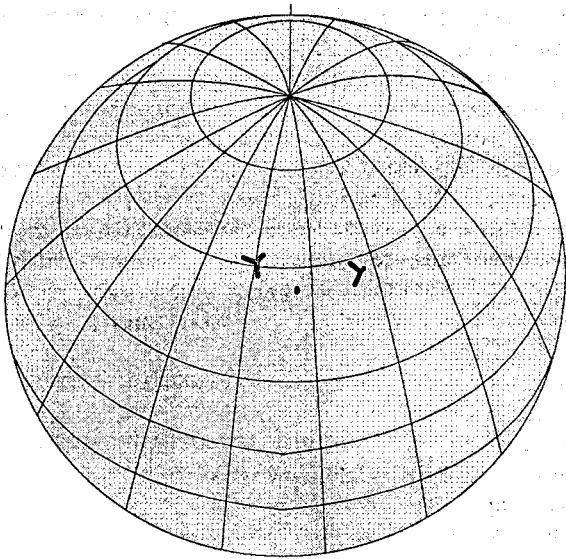


Рисунок 6.11 – Взаємне розташування граничної області та апроксимуючої сфери з великим R

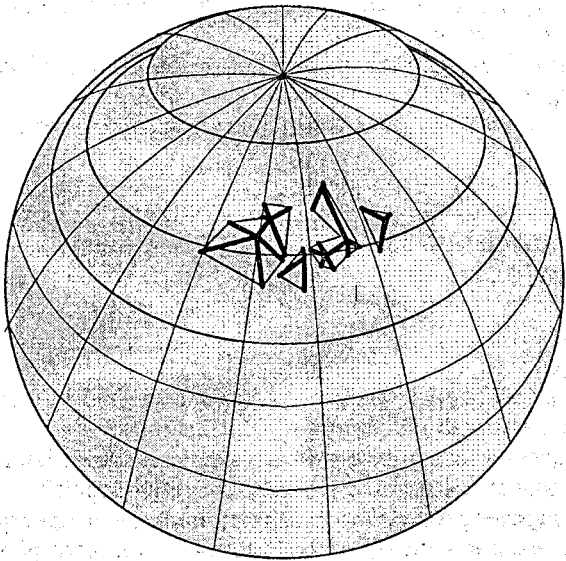


Рисунок 6.12 – Взаємне розташування граничної області та апроксимуючої сфери з «оптимальним» R

3. Унімодальні гістограми наближаються стандартними розподіленнями з мінімальною відносною похибкою $\delta\chi^2$.
4. Виконується нормування параметрів усіх пристроїв, що виробляються, за допомогою нормувальних функцій, які відповідають апроксимуючим розподіленням з мінімальною похибкою наближення.
5. В координатах нормованих параметрів будується область існування всіх моделей пристроїв, що виробляються.
6. Границя області існування пристроїв з негіршими параметрами наближається деякою стандартною поверхнею з мінімальною похибкою $\delta\chi^2$.
7. Параметри наближаючої поверхні (координати центра, радіус та т. п.) є оцінкою технічного рівня всієї множини пристроїв, що виробляються.
8. Визначається цільова функція, яка відповідає функції, що наближає границю з найменшою похибкою.
9. Кількісно інтегральна якість оцінюється відповідно до цільової функції для кожного оцінюваного пристрою окремо.
10. Ступінь спеціалізації кожної моделі пристрою визначається як середньоквадратичне ухилення від прямої $Z_n = Z_F = Z_P$

Контрольні запитання та вправи

1. Які нормативні документи регламентують порядок оцінювання технічного рівня та якості продукції?
2. З яких етапів складається процедура оцінювання технічного рівня та якості продукції?
3. Як вибирають пристрої-аналоги для порівняння у методиках визначення якості?
4. Які вимоги висуваються для нормувальних функцій?
5. За якими критеріями вибирається нормувальна функція?
6. Чи змінюються відношення переваги з застосуванням різних нормувальних функцій?
7. Як вибирається цільова функція для оцінювання технічного рівня та рівня якості?
8. Як використовують цільові функції?
9. Як пов'язані цільові функції та вагові коефіцієнти для кусково-лінійної апроксимації?
10. Яким чином можна оцінити кількісно ступінь спеціалізації пристроїв?
11. Як визначити основні напрямки розробки пристроїв?
12. Якими параметрами оцінюється технічний рівень пристроїв?
13. В чому полягає відмінність оцінювання технічного рівня від рівня якості пристроїв?
14. Які нормувальні та цільові функції слід використовувати для оцінювання якості спеціалізованих пристроїв і чому?

ЛІТЕРАТУРА

1. Кузьмин И. В. Оценка эффективности и оптимизации АСКУ / Кузьмин И. В. – М. : Сов. радио, 1971. – 296 с.
2. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы / Цапенко М. П. – М. : Энергия, 1974. – 320 с.
3. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств / Гуткин Л. С. – М. : Сов. радио, 1975. – 367 с.
4. Моисеев В. С. Системное проектирование преобразователей информации / Моисеев В. С. – Л. : Машиностроение, 1982. – 255 с.
5. Касаткин А. С. Эффективность автоматизированных систем контроля / Касаткин А. С. – М. : Энергия, 1975. – 88 с.
6. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / Новицкий П. В. – Л. : Энергия, 1968. – 248 с.
7. Юрлов Ф. Ф. Технично-экономическая эффективность сложных радиоэлектронных систем / Юрлов Ф. Ф. – М. : Сов. радио, 1960. – 280 с.
8. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус– К. : Вища школа, 1977. – 280с.
9. Негатроника / [Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Филинюк Н. А. и др.] – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 315 с. – Эффективность информационных устройств на основе негатронов. – С. 219–231.
10. Филинюк М. А. Критерий эффективности информационных устройств преобразования и управления / Филинюк М. А. – М. : Изв. вузов СССР. – Сер. «Приборостроение», 1989. – № 3 С. 3–8.
11. Багацкий В. А. Методика оценки технического уровня и качества проектирования и производства электронных устройств / Багацкий В. А. – К. : Знання, 1989. – 43 с.
12. Ле Туан Ту. Аналитические требования к критериям эффективности информационных устройств / Ле Туан Ту, Анфилов Р. А., Филинюк Н. А. – В кн. "Контроль і управління в технічних системах". – Вінниця : Вища школа, 1997. – С. 56–62.
13. Шарейко Л. А. Проблема эффективности вычислительных систем и пути её решения / Шарейко Л. А. – М. : АН СССР. – Научн. совет по комплексной проблеме "Кибернетика", 1981. – 315 с.

14. Чуманов Н. М. Оценка эффективности сложных технических устройств / Чуманов Н. М., Серебряный Е. Н. – М. : Сов. радио, 1980. – 191 с.
15. Росин М. Ф. Статическая динамика и теория эффективности систем управления / Росин М. Ф. – М. : Машиностроение, 1970. – 336 с.
16. Бриллоэн Л. Наука и теория информации / Бриллоэн Л. – М. : Физматгиз, 1960. – 392 с.
17. Новицький П. В. Система основных понятий при анализе качества измерительных средств / Новицький П. В., Зегджа П. Д. // Измерительная техника, 1971. – № 6. – С.18–20.
18. Оптоэлектронная схемотехника / [Кожемяко В. П., Натрошвили О. Г., Мартинюк Т. Б., Имнаишвили Л. Ш.] – К. : УМК ВО, 1988. – 276 с.
19. Симин А. В. Критерий качества СВЧ фильтров / Симин А. В., Холодник Д. В., Вендик Н. Б. // Крымико : материалы международной научно-технической конференции. – 2005. – С. 576–577.
20. Філінюк М. А. Критеріальна оцінка ефективності узагальнених перетворювачів імітансу // Філінюк М. А., Ле Туан Ту, Піддубний О. П. // Вісник ВПІ. – 1999. – № 1. – С. 85–90.
21. Лищинская Л. Б. Критеріальна оцінка ефективності многопараметричних ОПІ / Лищинская Л. Б. // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – том 9. – № 4. – С. 542–546.
22. Ліщинська Л. Б. Ефективність комбінованих керованих елементів на основі однокристалного узагальненого перетворювача імітансу / Ліщинська Л. Б., Барабан М. В., Філінюк М. А. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 1(21). – С. 69–75.
23. Лищинская Л. Б. Графоаналитический метод оценки эффективности комбинированных управляющих элементов на основе многопараметрических обобщенных преобразователей иммитанса / Лищинская Л. Б. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 2. – С. 67–72.
24. Комп'ютерна програма «Алгоритм ефективності узагальнених перетворювачів імітансу» / Ліщинська Л. Б., Войцеховська О. В., Барабан М. В., Філінюк М. А. // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 40301. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації 07.10.2011 р.

25. Комп'ютерна програма "Ефективність керованих комбінованих елементів на основі однокристалного узагальненого перетворювача іммітансу" / Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, О. В. Войцеховська, [та ін.] // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 42792. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 19.03.2012 р.

26. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / [Кондалев А. И., Багацкий В. А., Романов В. А., Фабричев В. А.] – Киев : Наук. думка, 1987. – 280 с.

27. Методические указания по оценке технического уровня и качества промышленной продукции РД – 50-149-79. – Изд-во стандартов. – 1979. – 78 с.

28. Геминтерн В. И. Оптимизация в задачах проектирования / В. И. Геминтерн, М. С. Шпильман. – М. : Знание, 1982. – 63 с.

Список умовних позначень

- АВС – автоматична випробувальна система
АСК – автоматизована система контролю
АСКК – автоматична система контролю і керування
АСК – автоматизована система керування
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВО – від'ємний опір
ДВО – динамічний від'ємний опір
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина
ІВС – інформаційно-вимірювальна система
ІМС – інтегральна мікросхема
ІП – інформаційний пристрій
ІПК – інформаційний пристрій керування
ІПП – інформаційний пристрій перетворення
ІС – інформаційна система
КЕ – керуючий елемент
ККД – коефіцієнт корисної дії
КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі
НВЧ – надвисокі частоти
П – перетворювач інформації
СВО – статичний від'ємний опір
ССП – струмовий конвеєр другого покоління
УП – узагальнений перетворювач імітансу
УП_N – багатопараметричний УП
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
ЦІС – центральна інформаційна система

ГЛОСАРИЙ

- Автоматизована система керування – automatize system of operation
- Автоматична випробувальна система – automatic testing system
- Вартість – value
- Вимірювальний засіб – measuring device
- Економічність - economy
- Ентропія – entropy
- Ефективність – efficiency
- Завадозахищеність – hindrance-protected
- Імовірність – probability
- Ідеальна система – perfect system
- Інформаційна система – information system
- Інформаційний пристрій – information device
- Інформаційно-вимірювальна система – information and measuring system
- Керуючий елемент – operating element
- Коефіцієнт ефективності – coefficient of efficiency
- Компонент – component
- Критерій ефективності – criterion of efficiency
- Надійність – reliability
- Неавтоматизована система – non-automatize system
- Механізована система – mechanized system

Оцінювання ефективності – estimation of efficiency

Оптимальність – optimality

Оптоелектроніка – optoelectronic

Параметр – parameter

Перетворювач інформації – information transformer

Показник ефективності – index of efficiency

Показник якості – index of quality

Прилад – device

Продуктивність – productivity

Синтез – synthesis

Точність – precision

Узагальнений критерій – generalized index

Узагальнений перетворювач імітансу – generalized immittance converter

Фільтр – filter

Частковий критерій – particular index

Швидкодія – fast-acting

Якість – quality

Навчальне видання

**Філінюк Микола Антонович
Багацький Валентин Олексійович
Ліщинська Людмила Броніславівна
Войцеховська Олена Валеріївна**

КРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено О. Войцеховською

Підписано до друку 27.01.2014 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman

Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 9,14.

Наклад 300 (1-й запуск 1-100) прим. Зам. №В2014-18.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Виготовлювач ФОП Барановська Т. П.

21021 м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 4377 від 31.07.2012.



Фідинюк Микола Антонович – доктор технічних наук, професор, академік Академії Інженерних наук України, заслужений діяч науки і техніки України, засновник наукового напрямку «Негатроніка», завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури Вінницького національного технічного університету.

Автор понад 600 наукових і навчально-методичних праць, в тому числі понад 30 монографій, підручників, навчальних посібників та понад 100 авторських свідоцтв і патентів на винаходи.



Багацький Валентин Олексійович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу перетворювачів форми інформації Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова Національної академії наук України.

Автор понад 120 наукових і навчально-методичних праць, в тому числі 4 монографій, близько 40 патентів України та Росії на винаходи.



Ліщинська Людмила Броніславівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету.

Автор понад 250 наукових і навчально-методичних публікацій, в тому числі 7 монографій, 7 навчальних посібників та понад 50 авторських свідоцтв і патентів на винаходи.



Войцеховська Олена Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури Вінницького національного технічного університету.

Автор понад 70 наукових і навчально-методичних публікацій, в тому числі 3 монографій та понад 20 патентів на винаходи.