Функціональне програмування

Лектор Ковалюк Тетяна Володимирівна
к.т.н., доцент
tkovalyuk@ukr.net

Scheme

Основи мови SCHEME – діалекту LISP

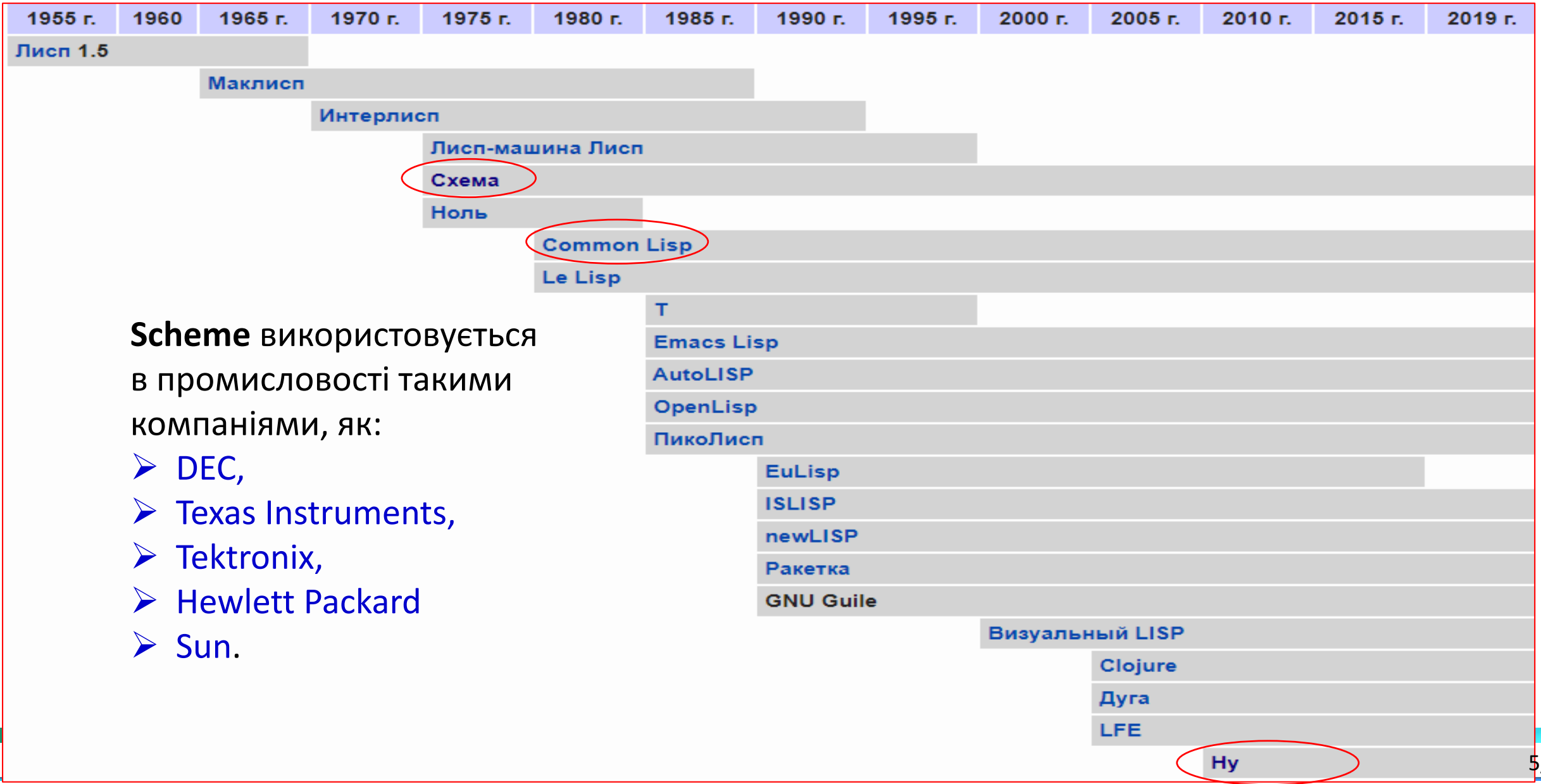
План лекції 2

1. Історія Lisp
2. Використання мови Scheme
3. Основні типи мови Scheme
4. Вирази та значення виразів
5. Комбінаційні форми
6. Інфіксний та префіксний запис арифметичних виразів
1. Імена, зв’язування та оточення
7. Складені процедури
8. Умовні вирази та предикати
9. Елементарні предикати та операції логічної композиції
10. Приклад. Обчислення квадратного кореня методом Ньютона

Історія Lisp

- Назва мови **ЛІСП** походить від англійського «**List Processing**» (обробка списків).
- Мова створювалася для символьної обробки задач диференціювання та інтегрування алгебричних виразів.
- Мова створена Джоном Маккарті у 1960 р.
- Сьогодні ЛІСП представляє сім'ю діалектів, один з яких **SCHEME**.
- Ліспмає унікальну властивість розглядати **процедури як дані**. Це робить його одною із самих зручних мов для дослідження методів проектування програм, в яких не потрібна відмінність між пасивними даними та активними процесами їх обробки.

Хронологія діалектів LISP



Scheme використовується в промисловості такими компаніями, як:

- DEC,
- Texas Instruments,
- Tektronix,
- Hewlett Packard
- Sun.

Використання мови Scheme

1. Мова семантики і специфікації стилів документа (**DSSSL**), який забезпечує метод визначення таблиць стилів **SGML**, використовує підмножину Scheme.
2. Редактор растрової графіки з відкритим вихідним кодом **GIMP** використовує Scheme в якості мови сценаріїв.
3. **GNU Guile** - це краща мовна система розширень для проекту GNU, в якій реалізована реалізація мови Scheme. Guile використовується в таких програмах, як GnuCash , LilyPond , GNU Guix , Guix System Distribution (GuixSD) и GNU Debugger .
4. Scheme використовується **Synopsys** в якості мови сценаріїв для своїх технологічних інструментів CAD (TCAD).
5. У фільмі The Spirits Within використовувалась мова Scheme в якості **мови сценаріїв** для управління двигуном рендеринга в реальному часі.
6. **Google App Inventor** для Android використовує Scheme для роботи на віртуальній машині Java, що працює на пристроях Android.

Особливості мови Scheme

1. *Scheme* є мовою програмування зі **статичними областями видимості**.
2. *Scheme* має **неявні**, а не декларативні, **типи**. Типи пов'язані з об'єктами (значеннями), а не із змінними. Отже, **Scheme є слабо типизована мова.**
3. Усі об'єкти, створені в процесі обчислення *Scheme*, включаючи процедури і продовження, мають необмежений екстент. **Жоден об'єкт Scheme ніколи не знищується.**
4. **Реалізації** *Scheme* повинні **бути чистими хвіст-рекурсивними**. В чистій хвіст-рекурсивній реалізації ітерація може бути виражена за допомогою звичайного механізму виклику процедур.
5. *Scheme* була одною з перших мов, що підтримують **процедури як об'єкти** самі по собі. Процедури можуть динамічно створюватися, заноситися в структури даних, повертатися в якості результатів процедур, і так далі.
6. **Арифметична модель** *Scheme* надає багатий набір числових типів і операцій з ними. В цій моделі розрізняються **точні і неточні числові об'єкти**: точний числовий об'єкт точно відповідає числу, а неточний числовий об'єкт є результатом обчислення, що спричинило округлення або інші помилки.

Механізми програмування

Будь-яка мова програмування реалізує три механізми:

1. **Елементарні вирази**, що представляють мінімальні сутності, з якими мова має справу.
2. **Засоби комбінування**, за допомогою яких з простих об'єктів складаються складні.
3. **Засоби абстракції**, за допомогою яких складні об'єкти можна називати і поводитися з ними як з єдиним цілим.

Будь-яка мова має справу з двома типами об'єктів :

- **процедури**
- **дані**

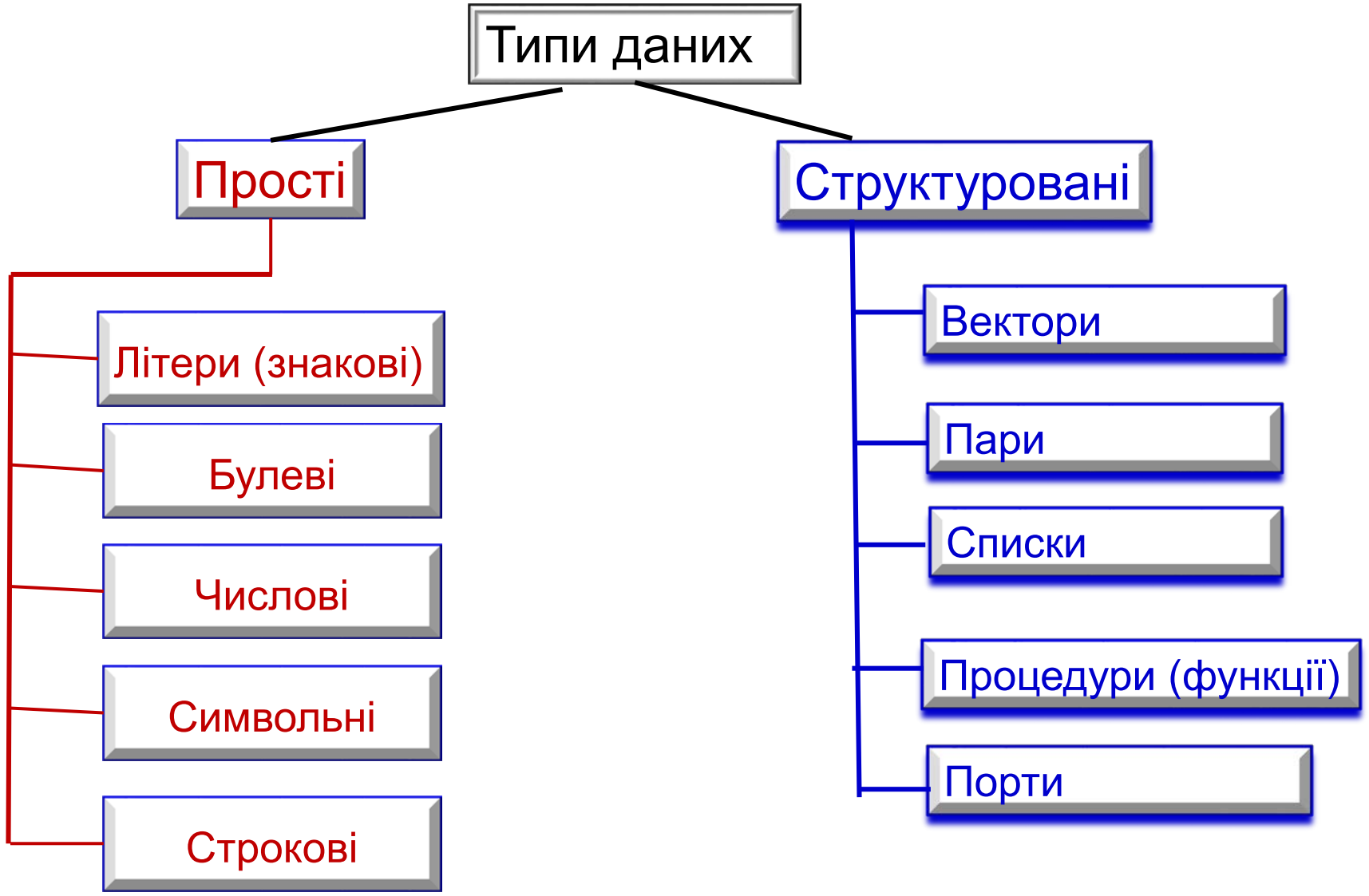
Дані - це "матеріал", який потрібно обробити,
Процедури - це описи правил обробки даних.

Основні типи мови Scheme

Об’єкт ≅≅ значення

- Програми мовою Scheme оперують **об'єктами**, які називаються **значеннями**.
- Об'єкти Scheme організовані в **набори значень**, які називаються **типами**.

Основні типи мови Scheme



Основні типи мови Scheme

Булеві

Булевий тип є логічним значенням і може бути **true** або **false**.
Об'єкт "false" в Scheme записується як **#f.**
Об'єкт "true" записується як **#t**.
Будь-який об'єкт, відмінний від **#f**, інтерпретітуется як **true**.

Числові

Scheme підтримує безліч числових типів даних, включаючи об'єкти, що представляють цілі числа довільної точності, раціональні числа, комплексні числа і наближені числа різних видів.

47 1/3 2.3 4.3e14 1+3i

- Кожне ціле число (integer) є дробом (rational),
- Кожний дріб є дійсним числом (real),
- Дійсне число є комплексним (complex).
- Числа класифікуються за ознакою точності (точне або приблизне - exact / inexact):

Основні типи мови Scheme

Літери (Знакові)

Знаки Scheme в основному відповідають текстовим символам. Вони ізоморфні до скалярних значень стандарту Unicode.

#\a #\A \#space #\newline

Строкові

Рядки є кінцевими послідовностями символів фіксованої довжини і, таким чином, представляють довільні тексти Unicode.

”рядок тексту”

Символьні

Символ використовується для позначення змінних.

this-is-a-symbol abc a32 >adfasf23@#$%!<

- Символи не чутливі до регістру букв.
- Символ може містити букви англійського алфавіту, цифри і літери + -. * / <=>! ? : $% _ & ~ ^

Основні типи мови Scheme

Пари і списки

Пара є структурою даних з двомя компонентами.
Списки, є лінійними структурами даних, які формуються з пар, де перший компонент ("car") є першим елементом списку, а другий компонент ("cdr") представляє іншу частину списку.
У Scheme є окремий **порожній список**, який є останнім в ланцюжку пар, що формують список.

Вектори

Вектори, як і списки, є лінійними структурами даних, що представляють кінцеві послідовності довільних об'єктів. Оскільки елементи списку доступні послідовно через ланцюжок пар, що представляють його, до елементів вектора звертаються за **цілими індексами**. Таким чином, вектори забезпечують **довільний доступ до елементів**.
Вектор може складатися з **будь-яких** об'єктів даних.

Процедури

У Scheme процедури є значеннями.

Порти

Відкриті файли або мережеві з'єднання

Вирази та значення виразів

Вирази можуть обчислюватися, породжуючи значення.

Літеральні вирази

#t 23

Така форма запису означає, що вираз #t обчислюється в значення #t, тобто значення для "true" вираз **23** обчислюється в чисельний об'єкт, який представляє число **23**.

Складені вирази

Створюються шляхом розміщення круглих дужок навколо своїх підвиразів.
Перший підвираз ідентифікує операцію; інші підвирази є операндами операції:

(+ 23 42) ⇒ 65
(+ 4 (* 2 3)) ⇒ 10

Складені вирази в Scheme завжди записуються за допомогою **префиксной нотації**.

7 типів виразів

1. Константи: 'foo #\Z 3 “строка”
2. Посилання на змінні : foo joe a-long-name @#$!+-*/%<>
3. Створення процедур: (lambda (z) (* z z z))
4. Застосування процедур: (cube 37)
5. Умова: (if (< x 3) sqrt modulo)
6. Привоєння значень: (set! x 5)
7. Послідовність: (begin (write x) (write y) (newline))

Приклади виразів та їх значень

Звичайно робота з **інтерпретатором Scheme** відбувається за сценарієм:

- користувач уводить вираз
- інтерпретатор обчислює значення цього вираз й друкує результат.

```
10
 10
10.5
 10.5
```

результат

Числові константи позначають числа, які є їхніми значеннями. Розмаїтість доступних типів чисел залежить від реалізації мови, але всі реалізації підтримують **цілі й дійсні числа**, а багато хто ще й **раціональні й комплексні**.

Символ – це зображення букв, цифр і спеціальних знаків **(!$%&*/:=<>?^_ ~ +-.@**), що відрізняється від числа.

Головне призначення символів - **іменувати об'єкти**. **Тому, значенням символу є об'єкт, пойменований цим символом.**

За допомогою лапок символи можна вживати автономно.

Значенням виразу **'<символ>** є сам цей символ.

```
'Hello
 hello
```

Scheme нечутлива до регістра букв

Приклади виразів та їх значень

```
Hello
 Error: undefined variable
```

Оскільки з ім'ям **Hello** поки не зв'язано жодного значення, одержуємо повідомлення про помилку.

Рядкові константи записуються в подвійних лапках і представляють послідовності відображуваних знаків:

```
"Hello"
 "Hello"
```

З ім'ям **+, -, *, /** зв'язана вбудована функція, що обчислює суму (різницю, добуток, частку) чисел, що й є значенням. Однак сама функція не відображається: внутрішні подання функцій не читаються.

```
+
 #<procedure
+>
```

Дві логічні константи #t й #f позначають істину й хибність

```
#f
 #f
```

```
(= 1 2)
 #f
```

Константи й символи носять загальне ім'я **атоми**, оскільки являють собою найпростіші елементи мови, з яких будуються вирази

Комбінаційні форми

Вирази, що представляють числа, можуть поєднуватися з виразом, що представляє елементарну процедуру (наприклад, + або *), так що складений вираз є застосування процедури до цих чисел.

```
(+ 137  349)
      486
(- 1000  334)
      666
(* 5  99)
      495
(/ 10  5)
      2
```

- Вирази, що утворюються шляхом запису списку виразів в скобках з метою позначити застосування функції до аргументів, називаються **комбинаціями** (combinations).
- Найлівіший елемент в списку называється **оператором** (operator), а інші елементи - **операндами** (operands).
- Значення комбінації обчислюється шляхом застосування процедури, що задається **оператором** до **аргументів** (arguments), які є значеннями операндів.
- Правило, за яким оператор ставиться зліва від операндів, відоме як **префіксна нотація** (**prefix notation**)

Комбінаційні форми

Префіксний запис може поширюватися на процедури з довільною кількістю аргументів:

```
(+ 21 35 12 7)
75

(* 25 4 12)
1200
```

Префіксна нотація може розширюватися, дозволяючи комбінаціям вкладатися одна в одну:

```
(+ (* 3 (+ (* 2 4) (+ 3 5))) (+ (- 10 7) 6))
57
```

Згідно з правилами форматування будь-яка довга комбінація записується так, щоб її операнди вирівнювалися вертикально:

Загальне правило обчислення значення комбінації:

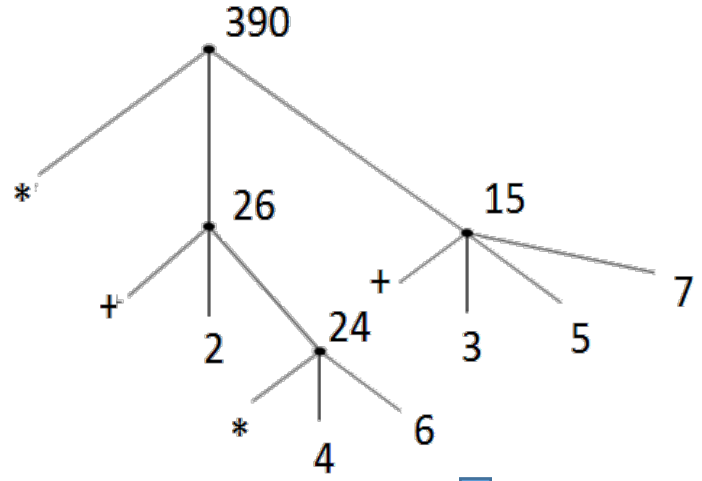
1. Обчислити значення всіх підвиразів.
2. Застосувати функцію, що є значенням оператора, до аргументів, які є значеннями операндів.
3. **Правило обчислення рекурсивне за своєю природою**

```
(+ (* 3
      (+ (* 2 4)
            (+ 3 5)))
   (+ (- 10 7)
   6))
```

Рекурсивне обчислення комбінацій

Рекурсивний процес обчислення комбінації зобразимо, намалювавши комбінацію у вигляді дерева:

Завдання:
(* (+ 2 (* 4 6))
(+ 3 5 7))



- Кожна **комбінація** представляється у вигляді вершини, а її **оператор і операнди** - у вигляді гілок, що виходять з цієї вершини.
- Кінцеві вершини представляють **оператори або числа.**
- Значення операндів розповсюджуються від кінцевих вершин вгору і потім комбінуються на все вищих рівнях.
- Правило обчислення "**розповсюдити значення вгору**" є прикладом загального типу процесів, відомого як **накопичення по дереву**

Порядок обчислення по дереву:

4*6=24

3+5+7=15

2+24=26

26*15=390

Інфіксний та префіксний запис арифметичних виразів

Математичний запис - інфіксний	Запис на Ліспі (Scheme) префіксний
f(x)	(f x)
g(x, y)	(g x y)
h(x, g(y, z))	(h x (g y z))
sin x	(sin x)
x + z	(+ x z)
x + y·z	(+ x (* y z))
xy	(expt x y)
|x|	(abs x)
x = y	(= x y)
x + y < z	(< (+ x y) z)

Види виразів

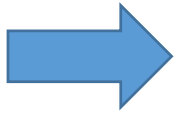
Можливі сім видів виразів:

1. Константи: 'foo # \ Z 3 "рядок"
2. Посилання на змінні: foo joe a-long-name @ # $! + - * /% <>
3. Створення функції: (lambda (z) (* z z z))
4. Застосування процедури: (cube 3 7)
5. Умова: (if (<x 3) sqrt modulo)
6. Присвоювання значення: (set! X 5)
7. Послідовність: (begin (write x) (write y) (newline))

Імена та зв’язування

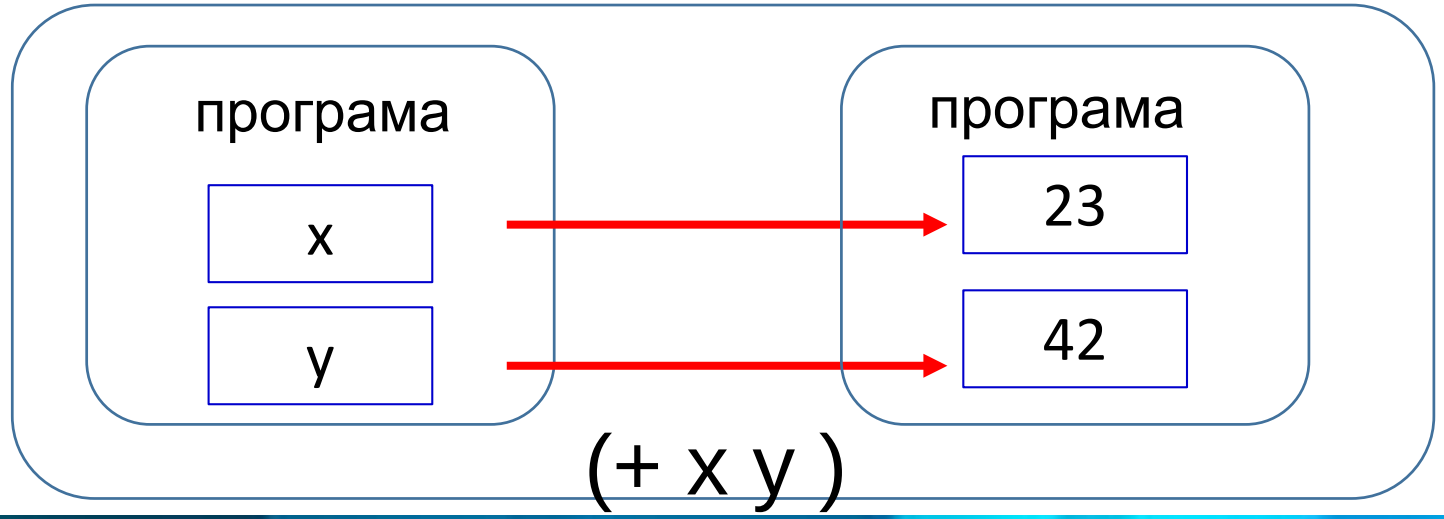
- Ім'я означає змінну, чиїм значенням є об'єкт
- Імена використовуються для вказівки на обчислювальні об'єкти.
- Scheme дозволяє **зв'язувати** ідентифікатори та значення.

```
(let ((x 23)
      (y 42))
  (+ x y))
```



65

x,y - локальні змінні



Імена та оточення

Scheme дозволяє створювати зв’язування верхнього рівня для ідентифікаторів шляхом створення нових об’єктів

Для визначення нових об'єктів, застосовуються ***визначальні форми:***

(define name value) зв'язує ім'я name зі значенням виразу value.

(define (f a1...an) body) визначає функцію з ім'ям f.

a1…an - формальні параметри, тобто імена, що використовуються усередині тіла функції для посилань на відповідні параметри.

body - тіло функції - вираз, що визначає її значення.

```
(define size 2)
```

примушує інтерпретатор зв'язати значення 2 з ім'ям size

Після того, як ім'я size пов'язано зі значенням 2, можемо вказувати на значення 2 за допомогою імені size :

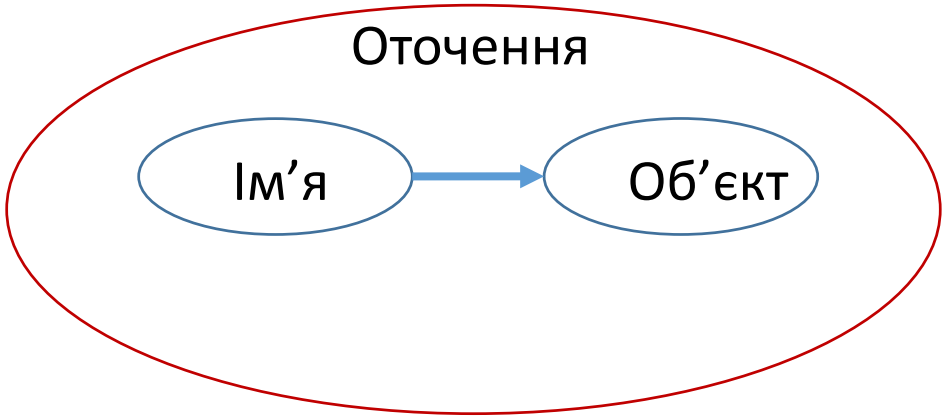
```
size
2
(* 5 size)
10
```

Імена та оточення

Раз інтерпретатор здатний асоціювати значення з символами і потім згадувати їх, то він повинен мати деякого роду пам'ять, що зберігає пари

ім'я-об'єкт.

Ця пам'ять називається **оточенням** (environment).



Імена та оточення

```
(define pi 3.14159)

(define radius 10)

(* pi (* radius radius))
314.159
(define circumference (* 2 pi radius)) circumference
62.8318
```

Слово define служить найпростішим **засобом абстракції**, тому що воно дозволяє використовувати прості імена для позначення результатів складних операцій

Правило обчислення комбінацій не обробляє визначень.

Наприклад, обчислення **(define x 3)** не означає застосування **define** до двох аргументів, один з яких є значення символу **x**, а інший дорівнює **3**, оскільки сенс **define** якраз і полягає в тому, щоб **зв'язати x** зі значенням 3.

Складені процедури

У мові Лісп/Scheme присутні:

- **Числа і арифметичні операції** є елементарними даними і процедурами.
- **Вкладення комбінацій** дає можливість комбінувати операції.
- **Визначення**, які зв'язують імена зі значеннями, дають обмежені можливості абстракції.

Лісп має **визначення процедур** (procedure definitions) - значно потужніший метод абстракції, за допомогою якого складеній операції можна дати ім 'я і потім посилатися на неї як на єдине ціле.

Загальна форма визначення процедури така:

((define (ім’я) (параметри) (тіло))

Складені процедури

Загальна форма визначення процедури така:

(define (ім’я) (формальні-параметри) (тіло)

(Ім'я) - це той символ, з яким треба зв'язати в оточенні визначення процедури.
(формальні-параметри) - це імена, які в тілі процедури використовуються для посилання на відповідні аргументи процедури.
(тіло) - це вираз, який обчислює результат застосування процедури, коли формальні параметри будуть замінені аргументами, до яких процедура буде застосовуватися.
(Ім'я) і (формальні- параметри) взяті в дужки, як це було б при виклику процедури

Запис мовою Лісп:

```
(define (square x)  *  x  x))
```

Ключове слово

ім’я функції

Формальний параметр

Тіло процедури

Складені процедури

Запис мовою Лісп:

```
(define (square x) * x x))
```

Ключове слово — ім'я функції — Формальний параметр — Тіло процедури

Семантика визначення процедури square

```
(define   (square   x)   *   x   x
```

щоб — піднести у квадрат — що-небудь, помножте — це — само на себе

Приклад виклику процедури square

```
(square 21)
441
(square (+ 2 5))
49
(square (square 3))
81
```

Визначення процедури для x^2+y^2

```
(define (sum-of-squares x y)
(+ (square x) (square y)))
```

Приклад виклику процедури sum-of-squares

```
(sum-of-squares 3 4)
25
```

Складені процедури

Тепер **sum-of-squares** можна використовувати як будівельний блок при подальшому визначенні процедур:

Визначення процедури

```
(define (f a)
(sum-of-squares (+ a  1) (* a  2)))
```

```
(define (sum-of-squares x y)
      (+ (square x) (square y)))
```

Виклик процедури

```
(f 5)
136
```

Виконання процедури (f 5)

$5+1=6$

$5*2=10$

$6^2+10^2=136$

Результат=136

Щоб застосувати складену процедуру до аргументів, потрібно обчислити тіло процедури, замінивши кожен формальний параметр відповідним аргументом.

Аплікативний і нормальний порядки обчислення

1. Інтерпретатор спочатку обчислює **оператор** і **операнди**, а потім застосовує отриману **процедуру до аргументів**.
2. Інша модель обчислення не обчислює аргументи, поки не знадобиться їх значення. Замість цього вона підставляє на місце параметрів вирази-операнди, поки не отримає вираз, в якому присутні тільки елементарні оператори, і лише потім обчислює його.

Наприклад, для обчислення (f 5) потрібна послідовність підстановок:

```
(define (sum-of-squares x y)
      (+ (square x) (square y)))
```

```
(define (f a)
(sum-of-squares (+ a  1) (* a  2)))
```

```
(sum-of-squares (+ 5 1) (* 5 2))
(+ (square (+ 5 1)) (square (* 5 2)) )
(+ (* (+ 5 1) (+ 5 1)) (* (* 5 2) (* 5 2)))
```

Після підстановок слідує редукції:

```
(+ (* 6 6) (* 10 10))
(+ 36 100)
136
```

Аплікативний і нормальний порядки обчислення

Метод «повна підстановка, потім редукція» відомий під назвою **нормальний порядок обчислень (normal-order evaluation).**

Метод «обчислення аргументів, потім застосування процедури» називається **аплікативним порядком обчислень (applicative-order evaluation).**

У Ліспі/Scheme використовується **аплікативного порядок обчислень** через додаткову ефективність, яка дає можливість не обчислювати багаторазово вирази.

Умовні вирази та предикати

Для виконання дій відповідно до певної умови використовують конструкцію, яка називається ***розбором випадків* (case analysis).** Наприклад, для обчислення модуля числа в Ліспі є конструкція **cond** (англ. *conditional*, «умовний»)

Математичне визначення

$$|x| = \begin{cases} x, \text{if } x > 0 \\ 0, \text{if } x = 0 \\ -x, \text{if } x < 0 \end{cases}$$

Конструкція в Ліспі

```
(define (abs x)
  (cond ((> x 0) x)
        ((= x 0) 0)
        ((< x 0) (- x))))
```

Загальна форма умовного виразу така:

(cond (*<p1> <e1>*)
(*<p2> <e2>*)
...
(*<pn> <en>*))

умова

вираз, що обчислюється

Конструкція **cond** складається з символу cond, за яким слідують в дужках пари виразів (<p> <e>), що називаються гілками.

<p> - предикат, тобто вираз, значення якого інтерпретується як істина або хибність.

<e> - вираз, що обчислюється

Умовні вирази та предикати

Загальна форма умовного виразу така:

(**cond (*<p1>* *<e1>*)**
(*<p2>* *<e2>*)
...
(*<pn>* *<en>*))

Умовні вирази обчислюються так:

1. Спочатку обчислюється предикат <p1>.
2. Якщо його значенням є хибним, обчислюється предикат <p2>.
3. Якщо значення <p2> також хибне, обчислюється <p3>.
4. Цей процес триває доки, поки не знайдеться предикат, значенням якого буде істина, і в цьому випадку інтерпретатор повертає значення відповідного виразу-слідства (consequent expression) в якості значення всього умовного виразу.
5. Якщо жоден з предикатів <p> не виявиться істинним, значення умовного виразу не визначено.

Предикат це процедура, яка повертає істину або хибність, а також висловлювання, які мають значенням істину або хибність.

Умовні вирази та предикати

Альтернативні умовні вирази та процедури для прикладу обчислення модуля числа

«Якщо x менше за нуль,
повернути −x;
інакше повернути x».

```
(define (abs x)
    (if (< x 0)
        (- x)
        x))
```

```
(define (abs x)
    (cond ((< x 0)
           (- x))
          (else  x)))
```

Загальна форма виразу if така:

(If <предикат> <наслідок> <альтернатива>)

Щоб обчислити вираз if, інтерпретатор спочатку обчислює його **<предикат>.**
Якщо **<предикат>** дає істинне значення, інтерпретатор обчислює **<наслідок>** і повертає його значення. В іншому випадку він обчислює **<альтернативу>** і повертає її значення.

Елементарні предикати та операції логічної композиції

Елементарні предикати **<, = , >**

Операції логічної композиції: **(and <e1>... <en>)**

1. Інтерпретатор обчислює вирази <e> по одному, зліва направо.
2. Якщо яке-небудь з <e> дає помилкове значення, значення всього виразу **and** - хибність і інші <e> не обчислюються.
3. Якщо усі <e> дають істинні значення, значенням вирази and є значення останнього з них.

(or <e1>... <en>)

1. Інтерпретатор обчислює вирази <e> по одному, зліва направо.
2. Якщо яке-небудь з <e> дає істинне значення, це значення повертається як результат виразу, а решта <e> не обчислюються.
3. Якщо всі<e> виявляються помилковими, значенням вирази **or** є брехня.

(not <e>)

Значення виразу **not** - істина, якщо значення виразу <e> хибне, і хибне в іншому випадку.

Елементарні предикати та операції логічної композиції

Приклади :

Предикат в Ліспі/Scheme

Число x знаходиться в діапазоні $5 < x < 10$

```
(and (> x 5) (< x 10))
```

Одне число більше або дорівнює іншому

```
(define (>= x y)
      (or (> x y) (= x y)))
```

```
(define (>= x y)
      (not (< x y)))
```

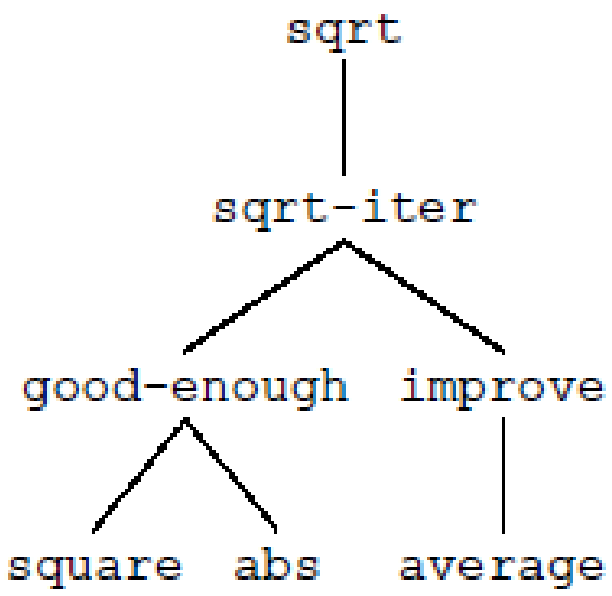
Приклад. Обчислення квадратного кореня методом Ньютона

Застосовуємо метод Ньютона послідовних наближень, який заснований на тому, що маючи деяке неточне значення **y** для квадратного кореня з числа **x**, можна отримати більш точне значення (ближче до справжнього квадратного кореня), якщо взяти **середнє** між **y** і **x / y**

Наближення	Частка x/y	Середнє
1	$\frac{2}{1} = 2$	$\frac{2+1}{2} = 1.5$
1.5	$\frac{2}{1.5} = 1.3333$	$\frac{1.3333+1.5}{2} = 1.4167$
1.4167	$\frac{2}{1.4167} = 1.4118$	$\frac{1.4167+1.4118}{2} = 1.4142$
1.4142	$\ldots$	$\ldots$

Приклад. Обчислення квадратного кореня методом Ньютона

Процедурна декомпозиція програми sqrt




```
(define (sqrt x)
    (sqrt-iter 1.0 x))

(define (sqrt-iter y x)
     (if (good-enough y x)
          y
          (sqrt-iter (improve y x) x)))

(define (good-enough y x)
      (< (abs (- (square y) x)) 0.001))

(define (improve y x)
     (average y (/ x y)))

(define (average x y)
   (/ (+ x y) 2))

(define (square x)
    (* x x))
```

```
(sqrt 9)
3.00009155413138
```

Приклад. Обчислення квадратного кореня методом Ньютона

```
(define (average x y)
    (/ (+ x y) 2))
```

(x+y)/2

```
(define (improve y x)
    (average y (/ x y)))
```

Під час розрахунку слід поліпшувати наближення до тих пір, поки його квадрат не співпаде з підкоренним числом в межах наперед заданого допуску, наприклад, 0.001

```
(define (good_enough y x)
    (< (abs (- (square y) x)) 0.001))

(define (sqrt_iter y x)
    (if (good-enough y x)
        y
        (sqrt-iter (improve y x)
            x)))
```

```
(define (square x) (* x x))

(define (sqrt x)
    (sqrt-iter 1.0 x))
```

```
(sqrt 9)
3.00009155413138
```

Формальні параметри процедур

- Формальні параметри процедури **локальні** по відношенню до тіла цієї процедури.
- Це означає, що за межами процедури ці параметри недоступні
- Визначення процедури **зв’язує** (binds) свої формальні параметри.
- Самі параметри називаються **зв’язаними змінними.**
- Множина виразів, для яких зв'язування визначає ім'я, називається **областю дії (scope) цього імені**.
- У визначенні процедури зв'язані змінні, оголошені як формальні параметри процедури, мають своєї областю дії **тіло процедури**
- Якщо змінна не зв’язана, то вона **вільна** (free).

Література з програмування на Scheme

1. Навчальні матеріали Ковалюк Т.В. https://github.com/tkovalyuk/
2. Стандарт Scheme, версія 6. http://www.r6rs.org/final/html/r6rs/r6rs-Z-H-2.html#node_toc_start
3. Стандарт Scheme, версія 7. Revised7 Report on the Algorithmic Language Scheme. http://www.larcenists.org/Documentation/Documentation0.98/r7rs.pdf
4. Абельсон Гарольд, Сассман Джеральд Джей, Сассман Джули. Структура и интерпретация компьютерных программ. https://www.twirpx.com/file/81061/
   https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/%D0%90%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC%D0%B8%20%D1%96%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%20%D0%BE%D0%B1%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D1%8C/%D0%94%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8/%D0%90%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BD%2C%20%D0%A1%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%BC%D0%B0%D0%BD%20-%20%D0%A1%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%20%D0%B8%20%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC.pdf
5. R. Kent Dybvig. The Scheme Programming Language. https://www.scheme.com/tspl4/
6. Кристиан Кеннек. Интерпретация Лиспа и Scheme. http://blog.ilammy.net/lisp/index.html
7. Майлингова О. Л., Манжелей С. Г., Соловская Л. Б. Прототипирование программ на языке Scheme. https://docplayer.ru/71381060-Prototipirovanie-programm-na-yazyke-scheme-metodicheskoe-posobie-po-praktikumu.html

Література з програмування на Haskell, Lisp, Common Lisp, ML

Інші мови функціонального програмування

1. Антон Холомьёв. Учебник по Haskell. https://docplayer.ru/25937980-Uchebnik-po-haskell-anton-holomyov.html
2. John Harrison. Введение в функциональное программирование. https://nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/8874/Harrison.pdf;jsessionid=7BDBFCF0EA05BFD026052B868E6DAEDF?sequence=1
3. Лидия Городняя. Введение в программирование на языке Лисп. http://window.edu.ru/resource/684/41684/files/prog_lisp.pdf
4. Практический Common Lisp. http://lisper.ru/pcl/pcl.pdf

Дякую за увагу

Доц. кафедри ПСТ к.т.н. Ковалюк Т.В.
tkovalyuk@ukr.net