Diskrétní matematika B – 12. týden
Kombinatorické výpočty

Michal Bulant

Masarykova univerzita
Fakulta informatiky

jaro 2013

Obsah přednášky

1. Řešení rekurencí
   - Fibonacciho čísla
   - Catalanova čísla
2. Exponenciální vytvořující funkce

Doporučené zdroje

- Martin Panák, Jan Slovák, **Drsná matematika**, průběžně připravovaný *e*-text.
- *Předmětové záložky v IS MU*
- Donald E. Knuth, **The Art Of Computer Programming**.
- Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. **Introduction to Algorithms**, MIT Press, 2009.
- Robert Sedgewick, Philippe Flajolet, **An Introduction to the Analysis of Algorithms**, Addison-Wesley, 1995.
- Ronald L. Graham, Donald E. Knuth, Oren Patashnik, **Concrete Mathematics**, Addison-Wesley, 1994.
- H. S. Wilf, **Generatingfunctionology**, Academic Press, 1994 , (rovněž `http://www.math.upenn.edu/~wilf/DownldGF.html`)

Řešení rekurencí – opakování

Mocninné řady jsou velmi silným nástrojem pro řešení rekurencí. Tím je míněno vyjádření členu a_n jako funkci n. Často se s pomocí řad podaří vyřešit na první pohled velmi složité rekurence.

Obvyklý (takřka mechanický) postup pro řešení rekurencí se skládá ze 4 kroků:

1. Zapíšeme jedinou rovnicí závislost a_n na ostatních členech posloupnosti. Tento vztah musí platit pro všechna $n \in \mathbb{N}_0$ (předpokládajíce $a_{-1} = a_{-2} = \cdots = 0$).
2. Obě strany rovnice vynásobíme x^n a sečteme přes všechna $n \in \mathbb{N}_0$. Na jedné straně tak dostaneme $\sum_n a_n x^n$, což je vytvořující funkce $A(x)$. Pravou stranu vztahu je pak třeba upravit na výraz rovněž obsahující $A(x)$.
3. Zjištěná rovnice se vyřeší vzhledem k $A(x)$.
4. Výsledné $A(x)$ se rozvine do mocninné řady, přičemž koeficient u x^n udává a_n, tj. $a_n = [x^n]A(x)$.

Fibonacciho čísla a zlatý řez

Připomeňme, že Fibonacciho čísla jsou dána rekurentním předpisem

$$F_0 = 0, F_1 = 1, F_{n+2} = F_{n+1} + F_n.$$

Již dříve jste si uváděli všemožné výskyty této posloupnosti v přírodě, v matematice nebo v teoretické informatice (podrobně viz `http://is.muni.cz/th/41281/prif_d/disertace.pdf`). Našim cílem bude (opět) najít formuli pro výpočet n-tého členu posloupnosti.

Poznámka

(Nejen) pro manipulace se sumami používají autoři *Concrete mathematics* velmi vhodné označení [*logický predikát*] – výraz je roven 1 v případě splnění predikátu, jinak 0.
Např. $[n = 1], [2|n]$ apod.
Pro vyjádření koeficientu u x^n ve vytvořující funkci $F(x)$ se pak často používá zápis $[x^n]F(x)$.

Příklad – pokr.

Uvažme vytvořující funkci $F(x)$ Fibonacciho posloupnosti. Pak zřejmě $F(x) - xF(x) - x^2F(x) = x$, a tedy

$$F(x) = \frac{x}{1 - x - x^2}.$$

Našim cílem je tedy odvodit vztah pro n-tý člen posloupnosti odpovídající vytvořující funkci $F(x) = \frac{x}{1-x-x^2}$.
Využijeme k tomu rozklad na parciální zlomky a dostaneme

$$\frac{x}{1 - x - x^2} = \frac{A}{x - x_1} + \frac{B}{x - x_2},$$

kde x_1, x_2 jsou kořeny polynomu $1 - x - x^2$ a A, B vhodné konstanty odvozené z počátečních podmínek. Po substituci $\lambda_1 = 1/x_1, \lambda_2 = 1/x_2$ dostáváme vztah

$$\frac{x}{1 - x - x^2} = \frac{a}{1 - \lambda_1 x} + \frac{b}{1 - \lambda_2 x},$$

odkud snadno pomocí znalostí o vytvořujících funkcích
$F_n = a \cdot \lambda_1^n + b \cdot \lambda_2^n$

Příklad – závěr

S využitím počátečních podmínek dostáváme

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right].$$

Jistě je zajímavé, že tento výraz plný iracionálních čísel je vždy celočíselný.
Uvážíme-li navíc, že $(1-\sqrt{5})/2 \approx -0.618$, vidíme, že pro všechna přirozená čísla lze F_n snadno spočítat zaokrouhlením čísla $\frac{1}{\sqrt{5}}(\frac{1+\sqrt{5}}{2})^n$. Navíc je vidět, že $\lim_{n\to\infty} F_n/F_{n+1} = 1/\lambda_1 \approx 0.618$, což je poměr známý jako zlatý řez – objevuje se již od antiky v architektuře, výtvarném umění i hudbě.
Analogický postup je možné použít při řešení obecných lineárních diferenčních rovnic k-tého stupně s konstatními koeficienty. Má-li charakteristická rovnice jednoduché kořeny, je situace jednodušší – viz dříve.

Rozklad na parciální zlomky – připomenutí

Jak jsme již viděli na příkladu Fibonacciho posloupnosti, v kroku 4 často s výhodou využijeme **rozkladu na parciální zlomky**. Ten jsme již viděli dříve (často se používá při integraci racionálních lomených funkcí), proto připomeneme jen stručně:

- Předpokládáme, že $P(x)/Q(x)$ je podíl polynomů, kde st $P <$ st Q (jinak vydělíme se zbytkem) a $P(x), Q(x)$ nemají společné kořeny.
- Polynom $Q(x)$ rozložíme na kořenové činitele.
- Jsou-li všechny kořeny $\alpha_1, \dots, \alpha_\ell$ jednoduché, pak

$$\frac{P(x)}{Q(X)} = \frac{A_1}{x-\alpha_1} + \cdots + \frac{A_\ell}{x-\alpha_\ell}.$$

- Má-li kořen α násobnost k, pak jsou příslušné parciální zlomky tvaru

$$\frac{A_1}{(x-\alpha)} + \frac{A_2}{(x-\alpha)^2} + \cdots + \frac{A_k}{(x-\alpha)^k}.$$

Rozklad na parciální zlomky – pokr.

- V případě dvojice komplexně sdružených kořenů nahrazujeme sčitanec $A/(x-\alpha)$ sčítancem $(Ax+B)/(x^2+px+q)$ včetně příslušných mocnin jmenovatele.
- Neznámé dopočítáme buď roznásobením a porovnáním koeficientů u jednotlivých mocnin x nebo dosazením jednotlivých kořenů.
- Výrazy $A/(x-\alpha)^k$ převedeme na výrazy tvaru $B/(1-\beta x)^k$ vydělením čitatele i jmenovatele výrazem $(-\alpha)^k$. Tento výraz již umíme rozvinout do mocninné řady.

Binární stromy a Catalanova čísla

S využitím vytvořujících funkcí určíme formuli pro počet b_n binárních stromů na n vrcholech, které je pro naše účely možné definovat jako kořen s uspořádanou dvojicí [*levý binární podstrom*, *pravý binární podstrom*]. Prozkoumáním případů pro malá n vidíme, že

$$b_0 = 1, b_1 = 1, b_2 = 2, b_3 = 5.$$

Snadno nahlédneme, že pro $n \geq 1$ vyhovuje b_n rekurentní formuli

$$b_n = b_0 b_{n-1} + b_1 b_{n-2} + \cdots + b_{n-1} b_0.$$

Vidíme, že jde vlastně o konvoluci posloupností. Vztah upravíme, aby platil pro všechna $n \in N_0$:

$$b_n = \sum_{0 \leq k < n} b_k b_{n-k-1} + [n = 0].$$

Tím máme hotov krok 1.

V kroku 2 vynásobíme obě strany x^n a sečteme. Je-li $B(x)$ odpovídající vytvořující funkce, pak:

$$\begin{aligned}
B(x) &= \sum_n b_n x^n = \sum_{n,k} b_k b_{n-k-1} x^n + \sum_{n,k} [n=0] x^n = \\
&= \sum_k b_k x^k \left(\sum_n b_{n-k-1} x^{n-k} \right) + 1 = \\
&= \sum_k b_k x^k (xB(x)) + 1 = B(x) \cdot xB(x) + 1.
\end{aligned}$$

Pozorný čtenář si jistě povšiml, že ve výše uvedeném výpočtu jsme nahradili konvoluci $b_n = b_0 b_{n-1} + b_1 b_{n-2} + \cdots + b_{n-1} b_0$ vztahem $b_n = b_0 b_{n-1} + \cdots + b_{n-1} b_0 + b_n b_{-1} + b_{n+1} b_{-2} + \cdots$. Díky naší konvenci to ale není problém a velmi to usnadňuje práci se sumami (s nekonečnými součty se zde pracuje podstatně snadněji než s konečnými, kdy musíme neustále hlídat meze).

V kroku 3 řešíme kvadratickou rovnici $B(x) = xB(x)^2 + 1$ pro $B(x)$:

$$B(x) = \frac{1 \pm \sqrt{1-4x}}{2x}.$$

Znaménko $+$ ale nepřichází v úvahu, protože pak by pro $x \to 0_+$ $B(x)$ měla limitu ∞, zatímco vytvořující funkce pro naši posloupnost musí mít v 0 hodnotu $b_0 = 1$.
Zbývá už pouze krok 4, tedy rozvinout $B(x)$ do mocninné řady. Rozvoj získáme pomocí zobecněné binomické věty

$$(1-4x)^{1/2} = \sum_{k \geq 0} \binom{1/2}{k} (-4x)^k = 1 + \sum_{k \geq 1} \frac{1}{2k} \binom{-1/2}{k-1} (-4x)^k$$

a po vydělení $1 - \sqrt{1-4x}$ výrazem $2x$ dostaneme

$$B(x) = \sum_{k \geq 1} \frac{1}{k} \binom{-1/2}{k-1} (-4x)^{k-1} =$$

$$= \sum_{n \geq 0} \binom{-1/2}{n} \frac{(-4x)^n}{n+1} = \sum_{n \geq 0} \binom{2n}{n} \frac{x^n}{n+1}.$$

Catalanova čísla

Dokázali jsme, že počet binárních pěstovaných stromů na n vrcholech je roven $b_n = \frac{1}{n+1}\binom{2n}{n}$ – tato významná posloupnost se nazývá posloupnost *Catalanových čísel*. Kromě toho, že Catalanova čísla vyjadřují počet binárních pěstovaných stromů, vystupují rovněž jako:

- počet slov délky $2n$ obsahujících n znaků X a Y takových, že žádný prefix slova neobsahuje více Y než X
- podobně takové fronty u pokladny (5koruny a 10koruny), že nezásobená pokladna může vždy vrátit
- počet korektně ozávorkovaných výrazů složených z levých a pravých závorek
- počet *monotónních* cest z $[0, 0]$ do $[n, n]$ podél stran jednotkových čtverců, které nepřekročí diagonálu
- počet různých triangulací konvexního $(n + 2)$-úhelníku.

Ještě jeden příklad

Příklad

Vyřešte rekurenci

$$a_0 = a_1 = 1$$
$$a_n = a_{n-1} + 2a_{n-2} + (-1)^n$$

Řešení

Tato rekurence je opět jiného typu než dosud studované. Jako vždy neuškodí vypsání prvních několika členů posloupnosti (teď ale ani moc nepomůže, snad jen pro kontrolu správnosti výsledku).[a]

[a] Narozdíl od tvrzení v *Concrete mathematics* je již možné tuto posloupnost nalézt v *The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences*.

Řešení (pokr.)

- Krok 1: $a_n = a_{n-1} + 2a_{n-2} + (-1)^n[n \geq 0] + [n = 1]$.
- Krok 2: $A(x) = xA(x) + 2x^2A(x) + \frac{1}{1+x} + x$.
- Krok 3:
$$A(x) = \frac{1 + x + x^2}{(1-2x)(1+x)^2}.$$
- Krok 4: $a_n = \frac{7}{9}2^n + \left(\frac{1}{3}n + \frac{2}{9}\right)(-1)^n$.

Rekurzivně propojené posloupnosti

Někdy dokážeme snadno vyjádřit hledaný počet jen pomocí více vzájemně provázaných posloupností.

Příklad

Kolika způsoby můžeme pokrýt (nerozlišenými) kostkami domina obdélník $3 \times n$?

Řešení

Snadno zjistíme, že $c_1 = 0, c_2 = 3, c_3 = 0$, dále klademe $c_0 = 1$ (nejde jen o konvenci, má to svou logiku).
Najdeme rekurzívní vztah – diskusí chování „na kraji“ zjistíme, že $c_n = 2r_{n-1} + c_{n-2}$, $r_n = c_{n-1} + r_{n-2}$, $r_0 = 0, r_1 = 1$, kde r_n je počet pokrytí obdélníku $3 \times n$, ze kterého jsme odstranili levý horní roh.

Řešení (pokr.)

Hodnoty c_n a r_n pro několik malých n jsou:

n	0	1	2	3	4	5	6	7
c_n	1	0	3	0	11	0	41	0
r_n	0	1	0	4	0	15	0	56

Řešení (pokr.)

- Krok 1: $c_n = 2r_{n-1} + c_{n-2} + [n = 0], \quad r_n = c_{n-1} + r_{n-2}.$
- Krok 2:
  $C(x) = 2xR(x) + x^2C(x) + 1, \quad R(x) = xC(x) + x^2R(x).$
- Krok 3:

$$C(x) = \frac{1 - x^2}{1 - 4x^2 + x^4}, \qquad R(x) = \frac{x}{1 - 4x^2 + x^4}.$$

- Krok 4: Vidíme, že obě funkce jsou funkcemi x^2, ušetříme si práci tím, že uvážíme funkci $D(z) = 1/(1 - 4z + z^2)$, pak totiž $C(x) = (1 - x^2)D(x^2)$, tj.
  $[x^{2n}]C(x) = [x^{2n}](1 - x^2)D(x^2) = [x^n](1 - x)D(x)$, a tedy $c_{2n} = d_n - d_{n-1}$.

Řešení (závěr)

Kořeny $1 - 4x + x^2$ jsou $2 + \sqrt{3}$ a $2 - \sqrt{3}$ a již standardním způsobem obdržíme

$$c_{2n} = \frac{(2+\sqrt{3})^n}{3-\sqrt{3}} + \frac{(2-\sqrt{3})^n}{3+\sqrt{3}}.$$

Podobně jako u Fibonacciho posloupnosti je druhý sčítanec pro velká n zanedbatelný a pro všechna n leží mezi 0 a 1, proto

$$c_{2n} = \left\lfloor \frac{(2+\sqrt{3})^n}{3-\sqrt{3}} \right\rfloor.$$

Např. $c_{20} = 413403$.

Exponenciální vytvořující funkce

Někdy mívá vytvořující funkce posloupnosti (a_n) komplikované vlastnosti, přičemž posloupnost $(a_n/n!)$ má vytvořující funkci daleko jednodušší. V takových případech raději pracujeme s tzv. **exponenciálními vytvořujícími funkcemi**

$$\widehat{A}(x) = \sum_{n\geq 0} a_n \frac{x^n}{n!}.$$

Jméno vychází z toho, že vytvořující funkcí *základní* posloupnosti $(1, 1, 1, 1, \ldots)$ je e^x.

$$e^x \overset{\text{e.v.f.}}{\longleftrightarrow} (1, 1, 1, \ldots),$$
$$\frac{1}{1-x} \overset{\text{e.v.f.}}{\longleftrightarrow} (1, 1, 2, 6, 24, \ldots)$$

Operace s exponenciálními vytvořujícími funkcemi

Zdůrazněme, že exponenciální vytvořující funkce se od obyčejných liší i standardními operacemi.

- Vynásobením x získáme funkci posloupnosti (na_{n-1}).
- Derivací získáme funkci odpovídající posunutí doleva.
- Integrací získáme funkci odpovídající posunutí doprava.
- Součinem dvou funkcí $\widehat{F}(x)$ a $\widehat{G}(x)$ získáme funkci $\widehat{H}(x)$, která odpovídá posloupnosti $h_n = \sum_k \binom{n}{k} f_k g_{n-k}$, tzv. *binomické konvoluci* f_n a g_n.

Příklad

Uvažme permutace na n-prvkové množině a označme $p_n = n!$ jejich počet. Pak příslušná e.v.f je

$$\sum_{n\geq 0} n! \frac{x^n}{n!} = \frac{1}{1-x}.$$

Příklad

Nyní uvažme cykly délky n na n-prvkové množině a označme c_n jejich počet. Snadno se ukáže, že $c_n = (n-1)!$. Pak příslušná e.v.f je

$$\sum_{n\geq 0} (n-1)! \frac{x^n}{n!} = \ln \frac{1}{1-x}.$$

Kombinatorické konstrukce

Jsou-li A, B třídy kombinatorických objektů s e.v.f $\widehat{A}(x), \widehat{B}(x)$, pak níže uvedeným konstrukcím odpovídají příslušné e.v.f:

disjunktní sjednocení . . . . $\widehat{A}(x) + \widehat{B}(x)$

uspořádané dvojice objektů z A a B . . . . $\widehat{A}(x) \cdot \widehat{B}(x)$

posloupnost k objektů z A . . . . $(\widehat{A}(x))^k$

posloupnost objektů z A . . . . $\frac{1}{1-\widehat{A}(x)}$

množina k objektů z A . . . . $\frac{(\widehat{A}(x))^k}{k!}$

množina objektů z A . . . . $e^{\widehat{A}(x)}$

cyklus k objektů z A . . . . $\frac{(\widehat{A}(x))^k}{k}$

cyklus objektů z A . . . . $\ln \frac{1}{1-\widehat{A}(x)}$

Příklad

Určete počet permutací n prvků s využitím faktu, že každá permutace je množina cyklů.

Řešení

E.V.f pro počet permutací je tedy podle předchozího přehledu

$$e^{\ln \frac{1}{1-x}} = \frac{1}{1-x},$$

jak jsme již jednou odvodili, odkud tedy $p_n = n![x^n]\frac{1}{1-x} = n!$.

Příklad

Určete počet permutací na n-prvkové množině, které nemají pevný bod.

Řešení

Analogicky jako výše jde o množinu cyklů (v tomto případě) délky větší než 1, proto je je příslušná e.v.f rovna

$$\widehat{D}(x) = e^{\sum_{n>1} x^n/n} = e^{\ln \frac{1}{1-x} - x} = \frac{e^{-x}}{1-x}.$$

Odtud $d_n = n![x^n]\widehat{D}(x) = n! \sum_{k=0}^{n} \frac{(-1)^k}{k!}$, což lze pro velká n aproximovat $d_n \approx \frac{n!}{e}$. Jinými slovy, pro velká n náhodná permutace n-prvkové množíny neobsahuje pevný bod s pravděpodobností cca $\frac{1}{e}$.

Příklad

Určete pravděpodobnost, že náhodná permutace 10 prvků nebude mít žádný cyklus delší než 5.

Řešení

Podobně jako dříve, odvodíme, že jde o to, určit $[x^{10}]e^{x+x^2/2+x^3/3+x^4/4+x^5/5}$. Tento výraz lze díky vhodné volbě konstant upravit na jednodušší

$$[x^{10}]\frac{1}{1-x}(1-\frac{x^6}{6})(1-\frac{x^7}{7})\cdots(1-\frac{x^{10}}{10})\cdots,$$

což je ale rovno

$$[x^{10}](1+x+x^2+\cdots+x^{10})(1-\frac{x^6}{6}-\frac{x^7}{7}-\cdots-\frac{x^{10}}{10}) =$$
$$= 1-\frac{1}{6}-\frac{1}{7}-\cdots-\frac{1}{10} \approx 0{,}354.$$

„Praktická“ aplikace

Deset odsouzených na smrt dostalo poslední šanci. Identifikace každého z nich byla umístěna do jedné z deseti přihrádek (do každé po jedné). Odsouzenci přistupují po jednom k přihrádkám a mohou otevřít pět z nich. Pokud každý z odsouzených nalezne svoji identifikaci, všichni dostanou milost jinak budou všichni popraveni. Navrhněte strategii, při níž budou mít co největší šanci na úspěch.

Příklad

1. Určete počet cyklů délky 1, které se objeví v rozkladu náhodné n-prvkové permutace na součin nezávislých cyklů
2. Určete počet inverzí v náhodné n-prvkové permutaci.

Příklad

Řešte rekurenci danou vztahem

$$a_n = \sum_{k \geq 0} \binom{n}{k} \frac{a_k}{2^k}, a_0 = 1.$$

Příklad

Řešte rekurenci danou vztahy $g_0 = 0, g_1 = 1$ a předpisem

$$g_n = -2ng_{n-1} + \sum_{k\geq 0} \binom{n}{k} g_k g_{n-k}.$$

Řešení

Vzhledem k rekurentnímu vztahu, který obsahuje binomickou konvoluci posloupností, se zdá vhodné využít *exponenciálních vytvořujících funkcí*. Označme $\widehat{G}(x)$ příslušnou exponenciální mocninnou řadu. Budeme postupovat v obvyklých čtyřech krocích.

- Krok 1: $g_n = -2ng_{n-1} + \sum_{k\geq 0} \binom{n}{k} g_k g_{n-k} + [n=1]$.
- Krok 2: $\widehat{G}(x) = -2x\widehat{G}(x) + \widehat{G}(x)^2 + x$.

Řešení (pokr.)

- Krok 3: Řešením kvadratické rovnice dostaneme $\widehat{G}(x) = 1/2(1 + 2x \pm \sqrt{1 + 4x^2})$. Dosazením $x = 0$ vidíme, že odpovídá znaménko $-$, proto je řešením funkce

$$\widehat{G}(x) = \frac{1 + 2x - \sqrt{1 + 4x^2}}{2}.$$

- Krok 4: Pomocí zobecněné binomické věty rozvineme $\widehat{G}(x)$ do mocninné řady. S využitím dříve dokázaného vztahu

$$\binom{-1/2}{k} = \left(-\frac{1}{4}\right)^k \cdot \binom{2k}{k}$$

a protože

$$\binom{1/2}{k} = \frac{1}{2k} \cdot \binom{-1/2}{k-1},$$

postupně dostaneme

Řešení (dokončení)

$$\sqrt{1+4x^2} = 1 + \sum_{k\geq 1} \frac{1}{k} \cdot (-1)^{k-1} \cdot 2 \cdot \binom{2k-2}{k-1} \cdot x^{2k}.$$

Odtud, protože

$$\sum_{n\geq 0} g_n \frac{x^n}{n!} = \widehat{G}(x) = \frac{1+2x-\sqrt{1+4x^2}}{2},$$

máme $g_{2k+1} = 0$ a

$$g_{2k} = (-1)^k \cdot \frac{1}{k}\binom{2k-2}{k-1} \cdot (2k)! = (-1)^k \cdot (2k)! \cdot C_{k-1},$$

kde C_n je n-té Catalanovo číslo.

Cayleyho formule

Cayleyho formule je vztah z kombinatorické teorie grafů, který udává, že počet stromů (tj. grafů, v nichž jsou libovolné dva vrcholy spojené právě jednou cestou) na n vrcholech je $\kappa(K_n) = n^{n-2}$. Dokážeme tento výsledek pomocí exponenciálních vytvořujících funkcí.
Označme pro jednoduchost $t_n = \kappa(K_n)$. Lze snadno spočítat, že $t_1 = t_2 = 1, t_3 = 3, t_4 = 16$. (Např. víme, že v případě stromů na 4 vrcholech musíme z $\binom{6}{3} = 20$ potenciálních grafů s právě 3 hranami odebrat ty možnosti, kde tyto hrany tvoří trojúhelník. Těch je ale právě $\binom{4}{3} = 4$).

Rekurentní vztah získáme tak, že zafixujeme jeden vrchol v a možné případy rozdělíme podle počtu komponent v grafu, který dostaneme z koster K_n tak, že odstraníme vrchol v a hrany s ním incidentní.

Pak pro $n > 1$

$$t_n = \sum_{m>0} \frac{1}{m!} \sum_{k_1+\cdots+k_m=n-1} \binom{n-1}{k_1, \ldots, k_m} k_1 \cdots k_m \cdot t_{k_1} \cdots t_{k_m}$$

Např. pro $n = 4$ máme $t_4 = 3t_3 + 6t_1t_2 + t_1^3$.

Ošklivě vypadající rekurenci zjednodušíme substitucí $u_n = nt_n$ (uvědomte si přitom, že u_n udává počet tzv. kořenových stromů). Dostáváme pro $n > 1$

$$\frac{u_n}{n!} = \sum_{m>0} \frac{1}{m!} \sum_{k_1+\cdots+k_m=n-1} \frac{u_{k_1}}{k_1!} \cdots \frac{u_{k_m}}{k_m!}$$

a je vidět, že vnitřní sumu dostaneme jako koeficient u x^{n-1} v m-té mocnině řady $\widehat{U}(x) = \sum u_n \frac{x^n}{n!}$. Proto je

$$\frac{u_n}{n!} = [x^{n-1}] \sum_{m\geq 0} \frac{1}{m!} \widehat{U}(x)^m,$$

a tedy

$$\widehat{U}(x) = x\, \mathrm{e}^{\widehat{U}(x)}\,.$$

Pro dokončení výpočtu budeme potřebovat tvrzení, které uvedeme bez důkazu.

Definice

Zobecněnou exponenciální mocninnou řadou $\mathcal{E}_t(x)$ nazýváme řadu

$$\mathcal{E}_t(x) = \sum_{k\geq 0} (tk+1)^{k-1} \frac{x^k}{k!}.$$

Snadno je vidět, že $\mathcal{E}_0 = e^x$, dále označujeme $\mathcal{E}(x) = \mathcal{E}_1(x)$.
Fakt: $\ln \mathcal{E}_t(x) = x \cdot \mathcal{E}_t(x)$, tj. spec. $\mathcal{E}(x) = e^{x\mathcal{E}(x)}$.
Srovnáním tohoto vztahu s výše uvedeným $\widehat{U}(x) = x\,e^{\widehat{U}(x)}$ vidíme, že $\widehat{U}(x) = x\mathcal{E}(x)$.
Proto

$$t_n = \frac{u_n}{n} = \frac{n!}{n}[x^n]\widehat{U}(x) = (n-1)![x^{n-1}]\mathcal{E}(x) = n^{n-2}.$$

Alternativní závěr výpočtu

Pokud vám přišel závěr výpočtu příliš umělý, zkusme to ještě jednou, s využitím tzv. Lagrangeovy inverzní formule:

Věta

Pokud vytvořující funkce $g(x) = \sum_{n \geq 1} g_n x^n$ *splňuje vztah*

$$x = f(g(x)),$$

kde $f(0) = 0, f'(0) \neq 0$, *pak*

$$g_n = \frac{1}{n}[u^{n-1}]\left(\frac{u}{f(u)}\right)^n.$$

Alternativní závěr výpočtu

Řešíme $\widehat{U}(x) = x\,\mathrm{e}^{\widehat{U}(x)}$, tj. $\widehat{U}(x)$ splňuje vztah $x = f(\widehat{U}(x))$, kde $f(u) = \frac{u}{e^u}$. Odtud z Lagrangeovy formule

$$
\begin{aligned}
[x^n]\widehat{U}(x) &= \frac{1}{n}[u^{n-1}]\left(\frac{u}{u/e^u}\right)^n \\
&= \frac{1}{n}[u^{n-1}]e^{un} = \frac{1}{n}\frac{n^{n-1}}{(n-1)!} = \frac{n^{n-1}}{n!}
\end{aligned}
$$

Protože $\frac{u_n}{n!} = [x^n]\widehat{U}(x)$, dostáváme odtud

$$t_n = \frac{u_n}{n} = n^{n-2}.$$