

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 28 (2000/2001)

Številka 1

Strani 34-41

Jože Grasselli:

O NAJMANJŠEM ŠTEVILU S PREDPISANIM ŠTEVILOM DELITELJEV

Ključne besede: matematika, teorija števil, delitelji, faktorizacija.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/28/1430-Grasselli.pdf>

© 2000 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

O NAJMANJŠEM ŠTEVILU S PREDPISANIM ŠTEVILOM DELITELJEV

Katero je najmanjše naravno število, ki ima 81 deliteljev? Ali obstaja od njega manjše naravno število, ki premore več kot 81 deliteljev?

1. Z delitelji mislimo na pozitivne delitelje. Število vseh deliteljev naravnega števila n označimo z $d(n)$. Ker ima 1 le delitelj 1, je $d(1) = 1$. Vsi delitelji števila 10 so 1, 2, 5, 10, zato je $d(10) = 4$. Pri majhnih n delitelje hitro poiščemo, in ko jih preštejemo, imamo $d(n)$. Navedimo obrazec, po katerem lahko $d(n)$ izračunamo:

Naj bo p praštevilo, a naravno število. Število p^a nima drugih deliteljev kot 1, p, \dots, p^{a-1}, p^a ; ker jih je $a + 1$, velja

$$d(p^a) = a + 1. \quad (1)$$

Če sta p, q različni praštevili in a, b naravni števili, so vsi delitelji števila $p^a q^b$ zajeti v seznamu

$$\begin{array}{cccc} 1, & p, & \dots, & p^{a-1}, & p^a \\ q, & pq, & \dots, & p^{a-1}q, & p^a q \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ q^b, & pq^b, & \dots, & p^{a-1}q^b, & p^a q^b \end{array}$$

V vsaki vrstici je $a + 1$ števil, vrstic pa je $b + 1$, vseh deliteljev za $p^a q^b$ je torej $(a + 1)(b + 1)$ ali

$$d(p^a q^b) = (a + 1)(b + 1). \quad (2)$$

Ko na podoben način nadaljujemo, ugotovimo: Število,

$$p_1^{a_1} p_2^{a_2} \dots p_j^{a_j}, \quad (3)$$

kjer so p_1, p_2, \dots, p_j različna praštevila in a_1, a_2, \dots, a_j naravna števila, premore $(a_1 + 1)(a_2 + 1) \dots (a_j + 1)$ deliteljev; tako je

$$d(p_1^{a_1} p_2^{a_2} \dots p_j^{a_j}) = (a_1 + 1)(a_2 + 1) \dots (a_j + 1). \quad (4)$$

Po (4) število $3000 = 2^3 \cdot 3 \cdot 5^3$ premore $4 \cdot 2 \cdot 4 = 32$ deliteljev.

Vsako naravno število, ki je večje od 1, ima en sam zapis (3) s produktom potenc praštevil (če zapišemo praštevila po velikosti). Pri velikih naravnih številih pa navadno ni preprosto to izrazitev (3) poiskati.

2. V razdelku 1 smo vpraševali, koliko deliteljev ima dano naravno število. Sedaj vprašanje obrnimo: Katera naravna števila imajo predpisano število deliteljev? Pri danem naravnem številu m iščemo torej vsa naravna števila x , za katere je

$$d(x) = m. \quad (5)$$

Pri $m = 1$ premore enačba (5) eno samo rešitev $x = 1$; edino naravno število z enim deliteljem je namreč 1.

Ko v (5) vzamemo $m = 2$, iščemo vsa naravna števila z dvema deliteljema. To so ravno vsa praštevila in enačba $d(x) = 2$ ima za rešitev vsako od praštevil. Rešitev je neskončno, saj je praštevil neskončno.

V enačbi (5) naj bo sedaj $m = 3$. Po (1) je za x mogoče vzeti p^2 , kjer je p praštevilo. Drugih rešitev pa enačba $d(x) = 3$ nima. Naj bo namreč x tretja ali višja potenca prašteviloma p ali pa x deljiv vsaj z dvema različnima praštevila p, q . Po (1) in (4) je za tak x vedno $d(x) \geq 4$. Vse rešitve enačbe $d(x) = 3$ so tako p^2 , kjer je p praštevilo; rešitev je spet neskončno.

Kako je pri $m = 4$? Iz (1) dobimo rešitev $x = p^3$, p praštevilo, iz (2) rešitev $x = pq$, p in q različni praštevili; drugih rešitev enačba $d(x) = 4$ nima. Za p^3 je neskončno možnosti, prav tako jih je za pq .

Obravnavajmo sedaj primer $m = 8$. Iščemo x v obliki (3); zaradi (4) preide enačba $d(x) = 8$ v enačbo

$$(a_1 + 1)(a_2 + 1) \dots (a_j + 1) = 2 \cdot 2 \cdot 2. \quad (6)$$

Ker desne strani ne moremo bolj razstaviti, so tudi na levi lahko največ trije faktorji, torej je $j \leq 3$. Poiskati moramo rešitev enačbe (6), ko je $j = 1, 2, 3$. Za $j = 1$ dobimo

$$a_1 + 1 = 8.$$

Torej je $a_1 = 7$ in $x = p^7$, p praštevilo. Ko je $j = 2$, se (6) glasi

$$(a_1 + 1)(a_2 + 1) = 4 \cdot 2.$$

Dobimo $a_1 = 3$, $a_2 = 1$ in $x = p_1^3 p_2$, kjer sta p_1, p_2 različni praštevili. Rešitev $a_1 = 1$, $a_2 = 3$ izpustimo, saj pripelje do istega x . Pri $j = 3$ je (6) oblike

$$(a_1 + 1)(a_2 + 1)(a_3 + 1) = 2 \cdot 2 \cdot 2.$$

Torej je $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ in $x = p_1 p_2 p_3$, kjer so p_1, p_2, p_3 različna praštevila. Vse rešitve enačbe $d(x) = 8$ so tako zajete v številih

$$p_1^7, p_1^3 p_2, p_1 p_2 p_3; \quad \text{kjer so praštevila } p_1, p_2, p_3 \text{ različna.} \quad (7)$$

Rešitve razpadejo na tri množice, vsaka vsebuje neskončno števil; v prvi množici je najmanjše število 2^7 , v drugi $2^3 \cdot 3$, najmanjše število tretje množice je $2 \cdot 3 \cdot 5$.

Podobno ugotovimo za $m = 16$, da so vse rešitve enačbe $d(x) = 16$ zajete z množicami

$$p_1^{15}, p_1^7 p_2, p_1^3 p_2^3, p_1^3 p_2 p_3, p_1 p_2 p_3 p_4, \quad (8)$$

kjer so p_1, p_2, p_3, p_4 različna praštevila.

V splošnem primeru ravnamo enako kot zgoraj za $m = 2, 3, 4, 8$. Naravno število $m > 1$ izrazimo v obliki

$$m = q_1 q_2 \dots q_s; \quad q_1 \geq q_2 \geq \dots \geq q_s, \quad (9)$$

kjer so q_1, q_2, \dots, q_s praštevila, ne nujno med sabo različna. Enakost (5) se potem glasi:

$$(a_1 + 1) \dots (a_j + 1) = q_1 q_2 \dots q_s. \quad (10)$$

Ker je na desni s praštevilskih faktorjev, mora biti $j \leq s$. Za vsak $j = 1, 2, 3, \dots, s$ iz (10) izhajajo ena ali več rešitev a_1, \dots, a_j ; vsaka taka rešitev daje $x = p_1^{a_1} \cdot \dots \cdot p_j^{a_j}$; tu je za različna praštevila p_1, \dots, p_j neskončno možnosti in tako že vsaka rešitev a_1, \dots, a_j za (10) pripelje do neskončno rešitev x za (5). Za $m = 16$ je $s = 4$ in v (8) nastopa pet oblik za x . Če je s velik, ima enačba (10) veliko rešitev in je za x potem na razpolago veliko oblik.

3. Iz razdelka 2 vemo: Pri danem naravnem številu $m > 1$ obstaja neskončno naravnih števil, ki imajo m deliteljev; najmanjše med števili, ki premorejo natanko m deliteljev, označimo z $A(m)$. Število m si mislimo zapisano v obliki (9).

Če je $s = 1$, je $m = q_1$; ker je q_1 praštevilo, ima enačba (10) le rešitev $a_1 = q_1 - 1$. Vse rešitve enačbe $d(x) = q_1$ so tako $x = p^{q_1 - 1}$, kjer je p praštevilo; najmanjše število med temi x je $2^{q_1 - 1}$ in velja

$$A(q_1) = 2^{q_1 - 1}; \quad q \text{ je praštevilo.} \quad (11)$$

Če je $s = 2$, je $m = q_1 q_1$ ali pa $m = q_1 q_2$ pri praštevilih q_1, q_2 in $q_1 > q_2$. Za $m = q_1 q_1$ dobimo iz (10), da je $a_1 = q_1^2 - 1$ ali pa $a_1 = q_1 - 1$, $a_2 = q_1 - 1$. Enačba (5) ima tedaj rešitve

$$p_1^{q_1^2-1}, p_1^{q_1-1} p_2^{q_1-1}; \quad p_1, p_2 \text{ sta različni praštevili.} \quad (12)$$

Za $m = q_1 q_2$, $q_1 > q_2$, je v (10) ali $a_1 = q_1 q_2 - 1$ ali pa $a_1 = q_1 - 1$, $a_2 = q_2 - 1$. To daje za enačbo (5) rešitve

$$p_1^{q_1 q_2 - 1}, p_1^{q_1 - 1} p_2^{q_1 - 1}; \quad \text{kjer sta } p_1, p_2 \text{ različni praštevili.} \quad (13)$$

Najmanjši med števili (12) sta $2^{q_1^2-1}$ in $2^{q_1-1} \cdot 3^{q_1-1}$. Ker je $q_1 \geq 2$, je

$$2^{q_1^2-1} = 2^{q_1-1} \cdot 2^{q_1(q_1-1)} \geq 2^{q_1-1} \cdot 4^{q_1-1} > 2^{q_1-1} \cdot 3^{q_1-1}$$

in število na koncu je najmanjše med števili (12). Zato je

$$A(q_1 q_2) = 2^{q_1-1} \cdot 3^{q_1-1}. \quad (14)$$

Najmanjši števili v (13) sta $2^{q_1 q_2 - 1}$ in $2^{q_1-1} \cdot 3^{q_1-1}$. Zaradi $q_1 > q_2 \geq 2$ je

$$2^{q_1 q_2 - 1} = 2^{q_1-1} \cdot 2^{q_1(q_2-1)} \geq 2^{q_1-1} \cdot 4^{q_2-1} > 2^{q_1-1} \cdot 3^{q_2-1}$$

in tako

$$A(q_1 q_2) = 2^{q_1-1} \cdot 3^{q_2-1}. \quad (15)$$

Ko primerjamo (14) in (15), vidimo, da je

$$A(q_1 q_2) = 2^{q_1-1} \cdot 3^{q_2-1}; \quad q_1, q_2 \text{ praštevili } q_1 \geq q_2. \quad (16)$$

Na podalgi obrazcev (11) in (16) je sestavljena preglednica

$$\begin{array}{ll} A(2) = 2 & A(6) = A(3 \cdot 2) = 2^2 \cdot 3 = 12 \\ A(3) = 2^2 = 4 & A(7) = 2^6 = 64 \\ A(4) = A(2 \cdot 2) = 3 \cdot 2 = 6 & A(9) = A(3 \cdot 3) = 2^2 \cdot 3^2 = 36 \\ A(5) = 2^4 = 16 & A(10) = A(5 \cdot 2) = 2^4 \cdot 3 = 48 \end{array} \quad (17)$$

Najmanjše od števil v množicah (7) je $2^3 \cdot 3$ in zato

$$A(8) = A(2 \cdot 2 \cdot 2) = 2^3 \cdot 3 = 24. \quad (18)$$

Dodajmo še dva zглеada. Po kratkem računu najdemo

$$A(16) = A(2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2) = 2^3 \cdot 3 \cdot 5 = 120, \quad (19)$$

po nekoliko daljšem pa

$$A(60) = A(5 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2) = 2^4 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 7 = 5\,040. \quad (20)$$

Najmanjše naravno število s 16 delitelji je torej 120, s 60 delitelji 5 040.

4. Zaznamujmo s $p'_1 = 2, p'_2 = 3, p'_3 = 5, p'_4 = 7, \dots, p'_s, \dots$ zaporedna praštevila. S številom $m = q_1 q_2 \dots q_s$, kjer so q_1, q_2, \dots, q_s praštevila in je $q_1 \geq q_2 \geq \dots \geq q_s$, je določeno število

$$B(q_1 q_2 \dots q_s) = 2^{q_1-1} \cdot 3^{q_2-1} \cdot \dots \cdot p_s^{q_s-1}. \quad (21)$$

Iz (21) najdemo

$$B(2) = 2$$

$$B(6) = B(3 \cdot 2) = 2^2 \cdot 3 = 12$$

$$B(3) = 2^2 = 4$$

$$B(7) = 2^6 = 64$$

$$B(4) = B(2 \cdot 2) = 2 \cdot 3 = 6$$

$$B(9) = B(3 \cdot 3) = 2^2 \cdot 3^2 = 36$$

$$B(5) = 2^4 = 16$$

$$B(10) = B(5 \cdot 2) = 2^4 \cdot 3 = 48$$

Dobili smo enake rezultate kot v (17); za $m = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10$ je torej $B(m) = A(m)$.

V splošnem pa števili $B(m)$ in $A(m)$ nista enaki. Po (18) je $A(8) = 24$, toda $B(8) = B(2 \cdot 2 \cdot 2) = 2 \cdot 3 \cdot 5 = 30$. Število $B(m)$ ima m deliteljev; to pove opredelitev (21). Ker je $A(m)$ najmanjše naravno število z m delitelji, je zmeraj

$$B(m) \geq A(m). \quad (22)$$

Ni težko pokazati, da obstaja neskončno takih m , za katere v (22) velja enačaja.

Za vsako praštevilo q je zaradi (21) in (11)

$$B(q) = A(q); \quad q \text{ je praštevilo.} \quad (23)$$

Pri praštevilih q_1, q_2 , kjer je $q_1 \geq q_2$, je po (21) in (16)

$$B(q_1 q_2) = A(q_1 q_2), \quad \text{kjer sta } q_1, q_2 \text{ praštevili in } q_1 \geq q_2. \quad (24)$$

Ker je praštevil neskončno, imamo v (23) in (24) neskončno naravnih števil, ko v (22) velja enačaj. Niso pa s tem opisani vsi takšni m .

Naravno število, pri katerem v (22) velja neenačaj in je torej $B(m)$ večji od $A(m)$, se imenuje *izjemno*. Da je tudi izjemnih števil neskončno, kažejo naslednji primeri.

Iz ocene

$$3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 = 1155 > 3^3 \cdot 5 \cdot 7 = 945$$

dobimo pri praštevilu q po (21)

$$B(q \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2) = 2^{q-1} \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 > 2^{q-1} \cdot 3^3 \cdot 5 \cdot 7. \quad (25)$$

Števili na obeh straneh neenačaja imata enako mnogo deliteljev, namreč $16q$. Ker je $A(q \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2)$ najmanjše naravno število s $16q$ delitelji, iz (25) izhaja

$$B(q \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2) > A(q \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2); \quad q \text{ praštevilo.} \quad (26)$$

Naj bo q izbrano praštevilo in p'_t najmanjše praštevilo z lastnostjo

$$p'_t > 2^q. \quad (27)$$

Ker je praštevil neskončno, je med njimi neskončno takih, ki so večja od 2^q . Pri vsakem danem q zato obstaja p'_t . Po (21) upoštevaje (27) izračunamo

$$B(q^t) = 2^{q-1} \cdot 3^{q-1} \cdot \dots \cdot p'_{t-1}{}^{q-1} \cdot p'_t{}^{q-1} > 2^{q-1} \cdot 3^{q-1} \cdot \dots \cdot p'_{t-1}{}^{q-1} \cdot 2^{q(q-1)}.$$

Število je na koncu enako

$$2^{q^2-1} \cdot 3^{q-1} \cdot \dots \cdot p'_{t-1}{}^{q-1}$$

in ima q^t deliteljev tako kot $B(q^t)$. Zato je

$$B(q^t) > A(q^t), \quad \text{kjer je } p'_t > 2^q \text{ in sta } p'_t, q \text{ praštevili.} \quad (28)$$

Tako v (26) kakor v (28) je zajetih neskončno izjemnih naravnih števil m , ko v (22) velja neenačaj. Seveda so še izjemna števila drugačnih oblik.

5. Rekli smo, da je $A(m)$ najmanjše naravno število z m delitelji. Zato je

$$d(A(m)) = m.$$

Naravno število m , pri katerem je izpolnjena enakost

$$A(d(m)) = m, \quad (29)$$

se imenuje *minimalno*. Ker pomeni $d(m)$ število deliteljev za m , lahko (29) preberemo: Naravno število m je minimalno, če ni manjšega naravnega števila s toliko delitelji, kot jih ima m .

Za praštevilo q je $d(2^{q-1}) = q$; po (11) je potem

$$A(d(2^{q-1})) = A(q) = 2^{q-1}.$$

Pogoj (29) je izpolnjen in število

$$2^{q-1}, \quad \text{kjer je } q \text{ praštevilo,} \quad (30)$$

je minimalno.

Pri praštevilu $q \geq 3$ iz (2) in (15) najdemo

$$A(d(2^{q-1} \cdot 3)) = A(q \cdot 2) = 2^{q-1} \cdot 3 \quad (31)$$

in število

$$2^{q-1} \cdot 3; \quad q \text{ liho praštevilo,} \quad (32)$$

je minimalno.

Minimalnih števil oblike (30) je neskončno, prav tako minimalnih števil oblike (32); niso pa s tem izčrpana vsa minimalna števila.

Navedimo še dve neskončni množici, katerih vsaka vsebuje le končno mnogo minimalnih števil.

Produkt vseh naravnih števil od 1 do n se imenuje n fakulteta in se označuje $n!$; za naraven n je torej

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (n-1) \cdot n.$$

Ugotovili so: Število $n!$ je minimalno za $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$, pri $n > 7$ pa število $n!$ ni minimalno.

Zaznamujmo $v(n)$ najmanjši skupni večkratnik števil $1, 2, \dots, n$. Dognano je: $v(n)$ je minimalno število za $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 27, 28$; za vsak drugačen n pa $v(n)$ ni minimalno število.

6. Dolžni smo še odgovor na vprašanje, zastavljeno na začetku. Ker je $81 = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3$, v enačbi (1) velja $s = 4$; iz rešitev te enačbe najdemo $A(81) = A(3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3) = 2^2 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \cdot 7^2 = 44\,100$. Najmanjše naravno število z 81 delitelji je tako 44 100; vsako od njega manjše naravno število

ima torej manj ali več deliteljev kot 81. Število $25\,200 = 2^4 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \cdot 7$ je manjše od 44 100 in premore $5 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 = 90$ deliteljev. Čeprav je 44 100 najmanjše naravno število z 81 delitelji, obstaja vsaj eno od njega manjše naravno število, ki ima več kot 81 deliteljev.

Naloge

1. Med števili $m = q_1 q_2 q_3$, kjer so q_1, q_2, q_3 praštevila in $q_1 \geq q_2 \geq q_3$, je izjemno le število $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$. Razen za $q_1 = q_2 = q_3 = 2$ velja zmeraj $B(q_1 q_2 q_3) = A(q_1 q_2 q_3)$. Preveri to trditev.
2. Izpelji, da je $A(16) = 120$, $A(60) = 5\,040$.
3. Pokaži, da je $A(2^6) = 2^3 \cdot 3^3 \cdot 5 \cdot 7$.
4. S. Ramanujan (1887–1920) imenuje naravno število $m > 1$ zelo sestavljeno, če je $d(n) < d(m)$ za vsak naraven $n < m$. To pomeni, da je zelo sestavljeno število m najmanjše naravno število z $d(m)$ delitelji. Ker je tako $A(d(m)) = m$, je zelo sestavljeno število obenem minimalno število. Minimalno število pa ni zmeraj zelo sestavljeno; po (30) je $2^4 = 16$ minimalno število, ni pa zelo sestavljeno, saj je $12 < 16$, toda

$$d(12) = d(2^2 \cdot 3) = 6 > 5 = d(2^4) = d(16).$$

Poišči še kakšno minimalno število, ki ni zelo sestavljeno.

5. Pri praštevilu q je po (30) število 2^{q-1} minimalno. Ker za $q \geq 5$ drži ocena

$$2^{q-1} = 2^{\frac{q-1}{2}} \cdot 2^{\frac{q-1}{2}} \geq 2^{\frac{q-1}{2}} \cdot 4 > 2^{\frac{q-1}{2}} \cdot 3,$$

velja

$$d\left(2^{\frac{q-1}{2}} \cdot 3\right) = \left(\frac{q-1}{2} + 1\right) \cdot 2 = q + 1 > q = d(2^{q-1})$$

in vidimo, da minimalno število 2^{q-1} ni zelo sestavljeno. Praštevil $q \geq 5$ je neskončno; med neskončno mnogo minimalnimi števili 2^{q-1} , $q \geq 5$ pa nobeno ni zelo sestavljeno. Na podoben način ugotovi: Če je q praštevilo, $q \geq 11$, minimalno število $2^{q-1} \cdot 3$ ni zelo sestavljeno.

6. Sestavi preglednico števil $d(m)$ za m od 2 do 200; iz nje vidiš: Vsa zelo sestavljena števila do 200 so 2, 4, 6, 12, 24, 36, 48, 60, 120, 180. (Čeprav je 2 praštevilo, je tudi zelo sestavljeno število.)
7. Ali je minimalno število $A(100) = 2^4 \cdot 3^4 \cdot 5 \cdot 7$ zelo sestavljeno (glej npr. število 14 400)?