

Računska pomagala kroz povijest

Sažetak: U članku su obrađena računska pomagala za izvođenje pojedinačnih računskih operacija s punim sudjelovanjem čovjeka operatera u svakom koraku postupka računanja. Od najstarijih pomagala, preko abaka, logaritamskih tablica i logaritamskih računala, mehaničkih računskih strojeva pa do elektroničkih kalkulatora, opisan je njihov razvoj kao rezultat razvoja matematike (potrebe) i tehnologije (mogućnosti). Pregled završava programibilnim elektroničkim kalkulatorima, dakle, ne obuhvaća analogne (električne, pneumatske, mehaničke) ni digitalne kompjutere.

Ključne riječi: računsko pomagalo, abak, logaritamske tablice, logaritamsko računalo, mehanički računski stroj, elektronički kalkulator

Uvod

Računanje je nedvojbeno jedan od najvećih dosega ljudskog uma. Teško je reći kad se u povijesti prvi put pojavilo nešto što bismo mogli nazvati računanjem i što zapravo proglasiti početkom računanja. Začeci računanja obavijeni su maglom daleke povijesti, skriveni nepostojanjem materijalnih artefakata te vrste i nepostojanjem ikakvih pisanih tragova. Pukim nagađanjem može se pretpostaviti da su prve računске operacije bile zbrajanje i oduzimanje, a da su prva pomagala za to bili nekakvi kamenčići, prutići i slično. Stoljeća, pa i tisućljeća, bila su potrebna da bi se računska pomagala razvijala onako kako se razvijala potreba za sve složenijim računanjem, ali i tehnologija koja bi omogućila izradu adekvatnih pomagala.

Novije doba razvoja matematike, a time i računanja, nastupilo je nakon srednjeg vijeka u Europi. To je vjerojatno povezano sa širenjem arapskog svijeta na zapad sve do Španjolske. Napredna matematika koju su oni donijeli imala je nulu i prikaz brojeva s mjesnom vrijednošću.

Razvoj matematike koji je nastupio dobro je došao za tri grane djelatnosti koje su se baš tad počele sve intenzivnije razvijati – navigaciju za plovidbu svjetskim morima, astronomiju te geodeziju (zemljomjerstvo) – za koje je opsežno i precizno računanje od odlučujućeg značenja.

Sedamnaesto stoljeće svjedočilo je naglom razvoju računskih pomagala baziranih na otkriću logaritama i na izumu logaritamskog računala te početku razvoja mehaničkih računskih strojeva.

Drugi je veliki skok procvat proizvodnje mehaničkih računskih strojeva u drugoj polovini XIX. stoljeća, uvjetovan potrebama i mogućnostima industrijske revolucije, koji se protegnuo i u drugu polovinu XX. stoljeća. Tad je nastupio i treći veliki skok – nagli razvoj elektroničkih kalkulatora i digitalnih kompjutera.

1. Definicija računanja

Pod nazivom “računanje” podrazumijevaju se sljedeći matematički postupci:

1. računske aritmetičke operacije (zbrajanje, oduzimanje, množenje i dijeljenje)
2. računanje vrijednosti matematičkih funkcija (kvadriranje, kubiranje, vađenje drugog i trećeg korijena, izračunavanje trigonometrijskih, eksponencijalnih, logaritamskih i drugih funkcija).

Pritom treba imati na umu sljedeće: osim rijetkih iznimaka (neke računske operacije s nekim brojevima koje rezultiraju cijelim brojevima ili razlomcima pa su “egzaktne”), velika većina računanja služi se realnim brojevima predstavljenim decimalnim brojevima s ograničenim brojem znamenki, dakle približnim brojevima! Dakle, većina naših računanja, čak i danas s pomoću najmodernijih pomagala, tek je približna!

Podjela računskih pomagala prema načinu prikaza brojeva

Prema načinu prikaza brojeva računska pomagala mogu biti:

- **analogna**, kod kojih je iznos broja predstavljen magnitudom neke “kontinuirane” veličine (najčešće duljine, ali može biti i napona, struje, kuta zakreta i slično) i
- **digitalna**, kod kojih je broj predstavljen znamenkama s mjesnom vrijednošću.

Analogna računska pomagala

Najvažnije je računsko pomagalo analognog tipa klasično (opće) logaritamsko računalo (engl. *slide rule*, njem. *Rechenschieber*, iz čega je u Hrvatskoj nastao popularan naziv “šiber”) kod kojeg je broj predstavljen duljinom na

skali, a slična su bila i brojna ‘analogna računala’ specijalizirana za pojedine uske primjene. Iako dosta jednostavna za uporabu, takva su računala imala veliku manu u ograničenoj preciznosti očitavanja ‘broja’, koja je ovisila o iznosu mjerene veličine i razlučivosti “mjernog uređaja” (oka za duljinu, voltmetra za napon, ampermetra za struju i slično). Primjerice, tipično je logaritamsko računalo duljine skale 25 cm i najboljem oku operatera (sposobnom razlučiti položaj crtice na desetinku milimetra) omogućavalo preciznost očitavanja četvrte znamenke na lijevom kraju skale (brojevi od 1 do 2) ili treće znamenke na desnom kraju skale (brojevi od 8 do 10), što je u oba slučaja značilo preciznost unosa ili očitavanja broja od oko $\pm 0,1\%$. To je bilo dovoljno za većinu tehničkih računa jer ni ulazni podaci često nisu preciznije poznati. No, za osjetljivije račune (zemljomjerstvo / geodezija, astronomija, navigacija), korišteni su podaci iz logaritamskih tablica (logaritmi brojeva i trigonometrijske funkcije) koji su bili precizni na obično pet, sedam ili devet znamenki), a za izvođenje aritmetičkih operacija služili su mehanički (digitalni) računski strojevi s većim brojem znamenki ili računanje “pješice” na papiru pa čak i abak.

Analognog su tipa bile i različite geometrijske konstrukcije koje su služile za npr. množenje ili dijeljenje po pravilu sličnosti trokuta i dr. I kod njih je točnost bila ograničena preciznošću crtanja pojedinih dužina ili kutova.

Digitalna računska pomagala

Većina ostalih računskih pomagala bila je digitalnog tipa (abak, računanje pisanjem na papiru, različite tablice, svi mehanički računski strojevi, zbrajalice tipa “Troncet”, elektronički kalkulatori) i kod njih se mogla postići bilo koja željena preciznost računanja uporabom pomagala s potrebnim brojem znamenki (mjesnih vrijednosti). Iako gornje granice broja znamenki nema, iz praktičnih razloga (složenost konstrukcije, veličina uređaja i cijena, ali i realno potreban broj znamenki pri unosu ili znamenki rezultata), broj znamenki ustalio se na 12 do čak 16 za računovodstvene potrebe ili na 8 do 13 za znanstvene i ostale potrebe.

Važno je uočiti da su, sve do pojave elektroničkih kalkulatora, sva digitalna računska pomagala obavljala samo aritmetičke operacije! Neka od njih mogla su samo zbrajati i oduzimati, neka i množiti i dijeliti (ili samo množiti), a uz posebne komplicirane operaterove zahvate neka su mogla čak i vaditi drugi i treći korijen, ali sve do kraja razvoja mehaničkih računskih strojeva ni jedan od njih nije imao mogućnost izračunavanja transcendentnih funkcija! Jedina dva mehanička stroja koja su trebala moći izračunavati i transcendentne funkcije bili su Difference engine (oko 1822.) i Analytical engine (oko 1835.) Engleza Charlesa Babbagea, ali oni su bili toliko komplicirani da nisu s tadašnjom tehnologijom mogli biti dovršeni. Kao kuriozitet, londonski Muzej znanosti (Science

Museum) konstruirao je funkcionalni Diferencijalni stroj 2 između 1989. i 1991. godine u čast 200. godišnjice Babbageova rođenja. Napravljen točno prema Babbageovim crtežima, bio je sastavljen od 25 tisuća dijelova, težio je 13,6 tona i bio 2,4 m visok.

Dakle, prije ere elektroničkih kalkulatora potrebne funkcije (izračunavanje trigonometrijskih, eksponencijalnih, logaritamskih i drugih funkcija, a donekle i kvadriranje, kubiranje, vađenje drugog i trećeg korijena) nisu se po potrebi računale, nego su se iz tablica ili sa skala logaritamskog računala očitavale njihove vrijednosti koje je netko ranije mukotrpno izračunao (najčešće razvojem funkcije u red) i te rezultate objavio. I knjige (tablice) i logaritamska računala bili su razmjerno mali jer su samo prikazivali već izračunate rezultate.

Čemu služe računska pomagala?

Naoko suvišno pitanje ipak ima smisla – četiri su zadatka koja obavlja računsko pomagalo za aritmetičke operacije:

1. unos i, eventualno, pamćenje prvog unesenog broja
2. unos drugog broja za aritmetičku operaciju
3. obavljanje same računske (aritmetičke) operacije
4. prikaz i pamćenje dobivenog rezultata.

Redoslijed drugog i trećeg koraka kod nekih pomagala može biti i zamijenjen.

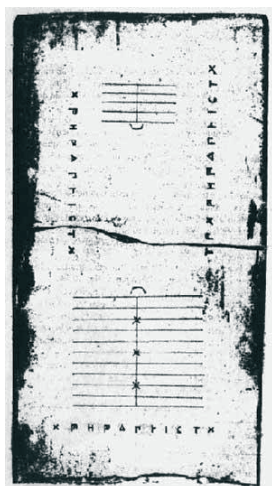
Za “izračunavanje” (očitanje) neke od transcendentnih funkcija (jedne varijable) tri su koraka računskog pomagala:

1. unos i, eventualno, pamćenje prvog unesenog broja
2. obavljanje same operacije izračunavanja funkcije (ili očitavanja izračunate funkcije)
3. prikaz i pamćenje dobivenog rezultata.

2. Računska pomagala kroz povijest

Počeci računanja sežu u daleku prošlost. Nema gotovo nikakvih tragova o samim počecima računanja pa je sve o tome izneseno u nastavku tek nagađanje. Vjerojatno su prve računske operacije bile zbrajanje i oduzimanje, a tek znatno kasnije množenje i dijeljenje.

O računskim pomagalima iz tog doba vrlo malo se zna, može se samo pretpostaviti da su bila jednostavna, možda skup kamenčića (lat. *calculus*, kamenčić) ili štapića, nekakav predmet na koji su urezivani zarezi i slično. Kasnije, ali još uvijek davno, pomagala su dotjerivana pa se navodno prije oko



Sl. 1.: Abak iz Salamine, dim.
150 cm × 75 cm × 4,5 cm



Sl. 2.: Sakupljač poreza računa na svojem abaku; prizor s Darijeve vaze (340. – 320. pr. Kr.), Arheološki muzej u Napulju



Sl. 3.: Köbel Böschenteyn, 1514.

**Ein New geordnet Rech
en buechlin auf den linien
mit Rechen pfeningen: den
Jungen angenden zu heil
lichem gebrauch vnd bend
ein leycheitlich zu lernen
mit figuren vnd exempel
Vollstendich tilis
lich angeordnet.**



Sl. 4.: Gregor Reisch, Margarita Philosophica, 1508.

**Ein New geordnet Rech
en buechlin mit den zyffern
den angenden schülern zu nutz. In
haltet die Eiben species Algorithmi:
mit samt der Regel de Try: vnd sechs regeln
prück: on der regel. Ist mit vil andern giten
gen den kindern zum anfang nützlich durch
Joann Schöfferen von Liffingen priester
nütlich auß gangen vnd geordnet.**



5000 godina u Mezopotamiji pojavilo nešto nalik kasnijem abaku, dakle, pločica s urezima po kojoj su se pomicale kuglice.

Kao rezultat sve brojnijih arheoloških istraživanja danas se često pronalaze stari artefakti kojima se pripisuje uloga računskog pomagala i oko toga se ispredaju sve fantastičnije priče. Odvija se prava utrka tko će naći impresivnije pomagalo iz što dalje prošlosti. Godine 1846. na otoku Salamini pronađena je mramorna ploča datirana oko 300. pr. Krista, slika 1., koja je po svemu sudeći služila za računanje. Iz tog doba potječe i slika sakupljača poreza koji računa

na svojem pomagalu, slika 2., prizor s tzv. Darijeve vaze (340. – 320. pr. Kr.). I među knjigama iz XVI. stoljeća mogu se naći one koje opisuju onodobno računanje, slike 3. i 4. Očito je to bila tajnovita i komplicirana djelatnost, ali lukrativna, a osobe koje su se njom bavile mogle su od toga živjeti.

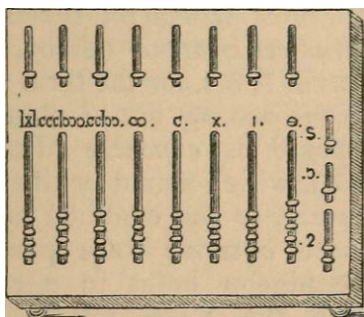
3. Abak

Abak u osnovi konstrukcije ima nizove kuglica (u početku smještenih unutar žlijeba, kasnije nanizanih na šipke ili žice), čijim se pomicanjem s jedne strane žlijeba / žice na drugu moglo obavljati zbrajanje ili oduzimanje. Dakle, abak je služio ponajprije za zbrajanje i oduzimanje brojeva. Znatno kasnije su Kinezi (kin. *suanpan*) i Japanci (jap. *soroban*) na njima mogli i množiti i dijeliti brojeve, a navodno obavljati i još neke računske operacije, poput vađenja drugog pa čak i trećeg korijena broja.

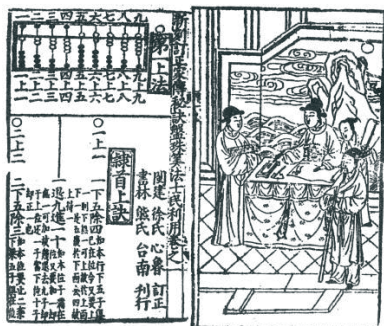
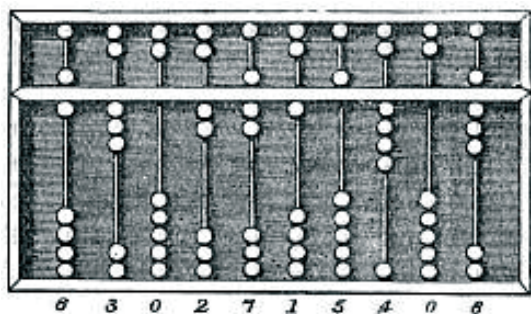
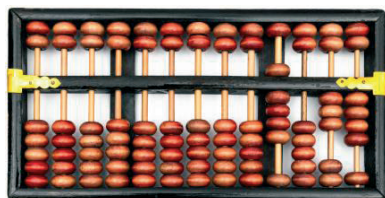
Zanimljiv je “rimski” abak, slika 5., naime, nizovi kuglica u utorima podsjećaju na kasnije abake kod kojih svaka žica predstavlja jednu mjesnu vrijednost broja, ali stari Rimljani nisu poznavali mjesnu vrijednost broja! (Sjetimo se samo rimskih brojeva!). To bi govorilo u prilog tezi da je rimski abak služio više za brojenje nego za računanje.

Predstavljanje broja znamenkama s mjesnom vrijednošću postalo je moguće tek nakon ‘izuma’ nule kao znamenke, a to se dogodilo znatno kasnije i u drugom dijelu svijeta. I danas se vode rasprave o tome gdje se to i kad dogodilo. U svakom slučaju, ‘nula’ je kao znamenka u Europu dospjela tek početkom XIII. stoljeća (1202.), kad ju je Fibonacci preuzeo iz arapske matematike.

Kineski je *suanpan*, slike 6. i 7., izumljen znatno ranije, ali je tek u doba dinastije Ming (1368. – 1636.) poprimio oblik kuglica na žici i postao popularan.



Sl. 5.: “Rimski” abakus, replika

Sl. 6.: *Suanpan* iz doba dinastije Ming, 1573.Sl. 7.: Broj 6,302,715,408 predstavljen na *suanpanu*Sl. 8.: Moderni kineski *suanpan*Sl. 9.: Moderni japanski *soroban*

Uočljiva je (slična) koncepcija kineskog, slika 8., i japanskog, slika 9., abaka – oba imaju okomite šipke i postoje dva polja: donje (“zemlja”) u kojem svaka kuglica vrijedi ‘1’, i gornje (“nebo”), u kojem svaka kuglica vrijedi ‘5’. Dakle, japanski *soroban* s $(4 \times 1 + 1 \times 5)$ kuglicom može na svakoj žici prikazati brojke od ‘0’ do ‘9’, dok kineski s $(5 \times 1 + 2 \times 5)$ kuglice može na svakoj žici prikazati znamenke od ‘0’ do ‘15’, dakle, osim dekadskog brojevnog sustava on može prikazivati i brojeve u heksadecimalnom sustavu (baze 16).

Japanski *soroban* nastao je razvojem iz kineskog, koji je bio uvezen u Japan u XIV. stoljeću. U početku je izvorni *suanpan* bio popularan u Japanu zbog heksadecimalnog japanskog novčanog sustava, ali oko 1850. jedna je nebeska kuglica uklonjena, a oko 1890. uklonjena je i jedna zemaljska i tako je stvorena moderna inačica *sorobana*.

Može se reći da su pred kraj razvoja, tj. u XX. stoljeću, i kineski *suanpan* i japanski *soroban* postali dobra računski pomagala za sve četiri računski operacije, pa čak i za vađenje drugog i trećeg korijena. Za računanja u kojima nije bilo potrebe za izračunavanjem trigonometrijskih funkcija može se reći da su to bila čak i bolja pomagala od (na “zapadu” uobičajene) kombinacije logaritamskog računala ili logaritamskih tablica s mehaničkim računskim strojem ili olovkom i papirom! A ako su bile potrebne i trigonometrijske funkcije, nije bilo drugog rješenja osim tablica trigonometrijskih funkcija (obično su bile u sklopu logaritamskih tablica).



Sl. 10.: Ruski ščet

Ruski je abak (rus. *ščet*) drukčiji – njegove su žice položene horizontalno i kuglice se pomiču lijevo-desno. Žice su izbočene da se spriječi slučajno premještanje kuglice na krivu stranu. Obično ima 13 žica s po deset kuglica, osim četvrte žice (gdjekad i prve) koja ima samo četiri kuglice, slika 10. Dvije srednje kuglice na svakoj žici tamne su boje, a ostale su svjetlije. Znatno je novijeg datuma, uveden je oko 1660. godine, a navodno se zadržao u nekim krajevima Rusije sve do danas kao pomagalo za zbrajanje u prodavaonicama.

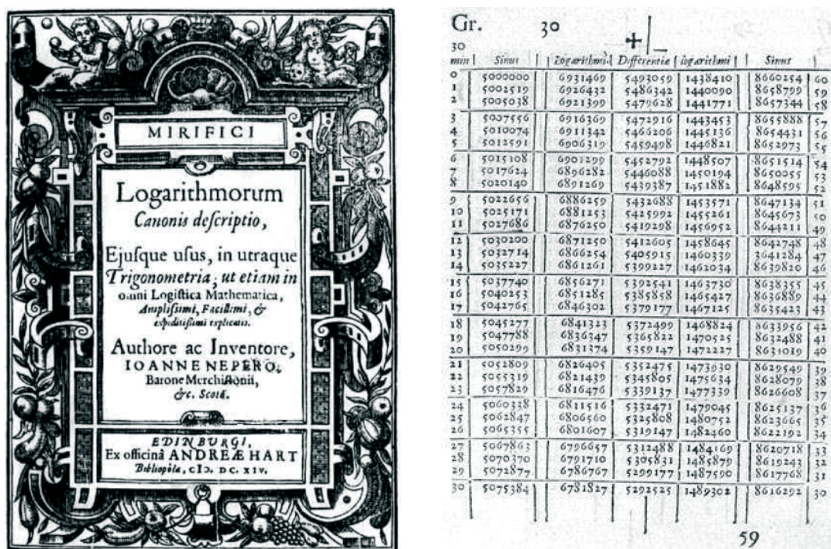
Osim abaka, za “više” računske operacije (množenje, dijeljenje, neka vrsta trigonometrije), potrebne za neke važne djelatnosti poput građevinarstva i navigacije, služile su tablice ili dijagrami na pločicama i slično. Tu su poznata dostignuća starih Grka u geometriji, ali i drugih starih naroda s područja Bliskog istoka.

4. Otkriće logaritama, logaritamske tablice

Iako se sve četiri osnovne računske operacije mogu i “pješice” provesti razmjerno brzo, ipak je množenje i dijeljenje tražilo više vremena, pogotovo ako je bila riječ o operacijama s višeznamenkastim brojevima. Zato je otkriće logaritama 1614. godine došlo kao brža alternativa za operacije množenja i dijeljenja.

Škot John Napier objavio je 1614. knjigu *Mirifici Logarithmorum Canonis descriptio* (*Opis čudesnog zakona logaritama*), slika 11., u kojoj je prvi opisao svojstva logaritama (prvi je logaritme otkrio Švicarac Joost Bürgi desetak godina prije, ali je to objavio tek 1620.).

Napier je otkrio tzv. prirodne logaritme i objavio prve tablice logaritama, čime je potaknuo i druge autore da prionu na mukotrpno računanje logaritama.



The image shows the title page and a page from John Napier's book 'Mirifici Logarithmorum Canonis Descriptio'. The title page is ornate, with a central text box containing the title and author information. The page next to it shows a table of logarithms with columns for 'Gr.', '30', '+', and '-'. The table lists logarithmic values for various numbers, including 1, 10, 100, 1000, and 10000.

Gr. 30 + -

mm	Sinus	Logarithmi	Differentie	Logarithmi	Sinus
0	1000000	6911409	5493059	14316410	8660154
1	1000000	6926432	5486142	1440090	8668799
2	1000000	6941399	5479618	14481771	8677344
3	1000000	6956309	5473496	1456043	8685888
4	1000000	6971142	5467206	1463756	8694431
5	1000000	6985909	5460848	1471281	8702973
6	1000000	6990129	5454429	1478707	8711514
7	1000000	6994282	5447948	1486033	8720055
8	1000000	6998369	5441405	1493258	8728596
9	1000000	7002390	5434800	1500383	8737137
10	1000000	7006345	5428132	1507408	8745678
11	1000000	7010234	5421400	1514333	8754219
12	1000000	7014057	5414604	1521158	8762760
13	1000000	7017814	5407744	1527883	8771291
14	1000000	7021505	5400820	1534508	8779822
15	1000000	7025130	5393841	1541033	8788353
16	1000000	7028699	5386800	1547458	8796884
17	1000000	7032212	5379704	1553783	8805415
18	1000000	7035669	5372553	1560008	8813946
19	1000000	7039070	5365347	1566133	8822477
20	1000000	7042415	5358086	1572158	8831008
21	1000000	7045704	5350780	1578083	8839539
22	1000000	7048937	5343429	1583908	8848070
23	1000000	7052114	5336034	1589633	8856601
24	1000000	7055235	5328594	1595258	8865132
25	1000000	7058300	5321109	1600783	8873663
26	1000000	7061319	5313579	1606208	8882194
27	1000000	7064282	5306004	1611533	8890725
28	1000000	7067199	5298384	1616758	8899256
29	1000000	7070060	5290719	1621883	8907787
30	1000000	7072875	5283009	1626908	8916318

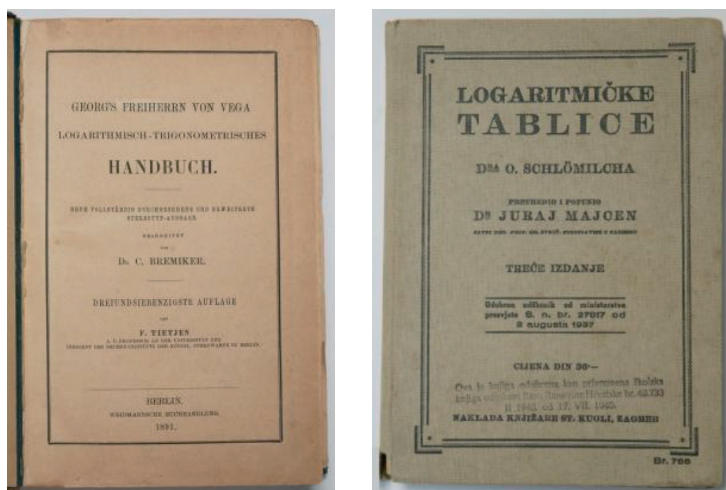
Sl. 11.: Naslovnica Napierove knjige *Mirifici Logarithmorum Canonis Descriptio* i jedna stranica iz njegovih tablica

Iako su prirodni logaritmi sastavni dijelovi mnogih važnih fizikalnih zakona, na prijedlog Henryja Briggsa, umjesto prirodnih, za računanje logaritama koji bi se upotrebljavali za množenje uzeti su dekadski logaritmi zbog dekadskog sustava kojim se i inače služimo. Time je bitno pojednostavnjena izrada i korištenje tablica. U tablicama je trebalo samo navesti mantisu logaritma (dio iza decimalnog zareza), a cjelobrojni dio bio je određen brojem cijelih mjesta broja ispred decimalnog zareza. Zato je bilo dovoljno, npr., navesti mantise logaritama brojeva od 1 do 10, a onda su logaritmi brojeva od 10 do 100 bili samo za "1" veći, logaritmi brojeva od 100 do 1000 bili još za "1" veći! Primjerice, $\log_{10} 2 @ 0,30103$, $\log_{10} 20 @ 1,30103$, a $\log_{10} 200 @ 2,30103$ itd.!

Osim Napiera i Briggsa, tablice logaritama objavio je velik broj autora, među kojima se ističe Slovenac Jurij Vega, čije su tablice prvi put objavljene 1783. Još opširnije izdanje objavio je 1794., da bi u sljedećih gotovo dvjesto godina doživjele više od sto izdanja širom svijeta.

Logaritmi brojeva nalaze se u 'logaritamskim tablicama', a navedeni su obično na pet, sedam ili devet decimala.

Osnovna je značajka i prednost logaritamske funkcije ta da je logaritam umnoška dvaju brojeva jednak zbroju logaritama tih dvaju brojeva. Dakle, trebamo li pomnožiti dva broja, umjesto uobičajenog postupka množenja na papiru, možemo uzeti njihove logaritme i zbrojiti ih, a dobiveni je zbroj logaritam traženog umnoška. Analogno, logaritam kvocijenta dvaju brojeva jednak je razlici logaritama dividenda i divizora.



Sl. 12.: Primjeri logaritamskih tablica – lijevo: Vegine tablice iz 1891., desno: Schlömilchove tablice iz 1926.

Praktički, to znači da logaritme dvaju brojeva moramo očitati iz tablica, što nije sasvim jednostavno, pogotovo za višeznamenkaste brojeve – prvo treba naći list u tablicama na kojem se nalazi prvi zadani broj, gdje kad i interpolirati vrijednosti ako se ne može izravno očitati logaritam, potom to isto učiniti za drugi broj te zbrojiti ta dva logaritma. Onda treba u tablicama naći stranicu na kojoj se nalazi izračunati logaritam (zbroj) i obratnim putem pronaći kojem broju pripada taj logaritam. Iako načelno brži, postupak baš i nije bio velika ušteda vremena zbog listanja po tablicama i potrebnih interpolacija.

Nažalost, pravilo logaritama vrijedi samo za množenje i dijeljenje, tako da te tablice nisu bile korisne za zbrajanje ili oduzimanje brojeva. Samom svojom pojavom logaritmi su ponudili prednost za množenje i dijeljenje, ali poteškoće vezane uz njihovu uporabu (mukotržno očitavanje logaritama iz tablica) to su otežale.

Nešto treba spomenuti: brojevi u svim tim tablicama bili su navedeni na danas uobičajen način sa znamenkama koje imaju mjesnu vrijednost pa su po tome one bile digitalna pomagala!

5. Logaritamsko računalo, *Rechenschieber*, šiber

Napierovo otkriće logaritama imalo je dalekosežne učinke na povijest računanja. Naime, na temelju svojstva logaritama da zbrajanje logaritama dvaju brojeva odgovara množenju samih brojeva, Edmund Gunter došao je 1620. na

ideju da logaritme brojeva nanese na ravnalo kao dužine i da, zahvaćajući šestarom razmake koji odgovaraju logaritmima dvaju brojeva i nastavljajući šestarom te razmake jedan na drugi, na ravnalu očita zbroj tih logaritama, a to znači očita i umnožak tih dvaju brojeva.

Ubrzo je, 1622., tu ideju usavršio William Oughtred, nadovezujući dva jednaka ravnala jedno uz drugo (umjesto šestarom dvaju razmaka na jednom ravnalu). Tako je stvoreno logaritamsko računalo koje je ostalo u uporabi dulje od tristo godina, sve negdje do 1975.

Logaritamsko je računalo tijekom tih godina doživjelo niz poboljšanja i dotjerivanja, ali osnovna ideja ostala je nepromijenjena — osnovni dio bili su “tijelo” ili “štap” računala (na kojem se nalazila jedna logaritamska skala) i pomični dio (“jezik”), na kojem se nalazila druga logaritamska skala. Uzdužnim pomicanjem jezika u odnosu na štap skale su se nastavljale u smislu zbrajanja ili oduzimanja dužina i tako su se obavljale operacije množenja ili dijeljenja.

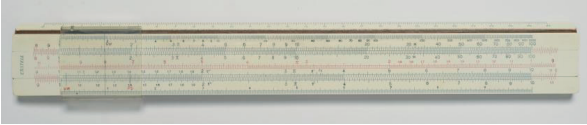
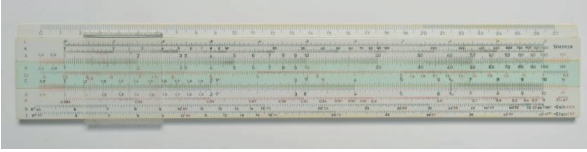
Osim toga, i na štapu, a obično i na jeziku, nalazile su se dodatne skale poravnane s logaritamskim skalama, koje su odgovarale različitim matematičkim funkcijama. Svakoj vrijednosti na logaritamskoj skali trajno je bila pridružena vrijednost njezine funkcije na nekoj skali. Postavljanjem kazaljke klizača na zadanu vrijednost argumenta na logaritamskoj skali odmah se mogla uočiti i očitati njoj pridružena vrijednost te funkcije. Ne samo to: ako se postavi kazaljka na vrijednost funkcije na skali funkcije, može se na logaritamskoj skali očitati pripadajuća vrijednost argumenta. Dakle, svaka funkcija na logaritamskom računalu imala je odmah i svoju inverznu funkciju!

U početku je logaritamsko računalo imalo svega dvije ili nekoliko skala, ali iskustvo je pokazalo da bi trebalo nekako standardizirati koje bi skale za koju struku bile potrebne. Kao prvo takvo standardizirano računalo spominje se sustav Mannheim iz 1859., slika 13., prema prijedlogu Francuza Amédéea Mannheim-a, koje je imalo samo jedan par osnovnih i jedan par kvadratnih skala. Duplex računalo sa skalama na objema stranama štapa i jezika predložio je William Cox godine 1891., slika 16., ali ono je pravu popularnost steklo tek znatno kasnije, oko sredine XX. stoljeća u sklopu nastojanja da se u jedno računalo uklopi što više skala. Još dva sustava bila su iznimno popularna među inženjerima: sustav Rietz koji je 1902. predložio njemački inženjer Max Rietz, slika 14., i sustav Darmstadt, slika 15., koji je 1934. godine predložio Alwin Walther, profesor na Tehničkoj visokoj školi u Darmstadtu.

Brzina rada s pomoću logaritamskog računala višestruko je veća nego s logaritamskim tablicama jer je (sporo) traženje logaritama brojeva u tablicama zamijenjeno (brzim) namještanjem kazaljke klizača, a (sporo) zbrajanje logaritama (brzim) pomicanjem jezika.

No, treba uočiti da je, zamjenom ‘broja dužinom’ čija duljina odgovara veličini broja, Gunterovo ravnalo i iz njega dobiveno logaritamsko računalo

Tablica 1: Četiri osnovna standarda logaritamskih računala

Tipični standardi logaritamskih računala	Popis skala
 Sl. 13.: Sustav Mannheim	logaritamsko računalo “No. 431”, Gebr. Wichmann, Njemačka, oko 1900. SKALE SPRIJEDA: A [B, C] D SKALE STRAGA: nema
 Sl. 14.: Sustav Rietz	logaritamsko računalo “Castell 1/87 Rietz”, A. W. Faber&Castell, Zapadna Njemačka, 1956. SKALE SPRIJEDA: K, A [B, CI, C] D, L SKALE STRAGA: [S, ST, T]
 Sl. 15.: Sustav Darmstadt	logaritamsko računalo “Staedtler Mars Model 54401”, Zapadna Njemačka, 1967. SKALE SPRIJEDA: L, K, A [B, CI, C] D, P, S, T. SKALE STRAGA: [LL1, LL2, LL3]
 Sl. 16.: Sustav Duplex	logaritamsko računalo “Castell 2/83N Novo-Duplex”, A. W. Faber&Castell, Zapadna Njemačka, 1973. SKALE SPRIJEDA: T1,T2, K, A, DF [CF, B, CIF, CI, C] D, DI, S, ST, P. SKALE STRAGA: LL03, LL02, LL01, LL00, W2 [W2', CI, L, C, W1'] W1, D, LL0, LL1, LL2, LL3.

postalo analogna računska sprava! Očitana duljina sad je postala ovisna o preciznosti oka onoga tko očitava, a to znači da je točnost logaritamskog računala ograničena. Dok su logaritamske tablice bile precizne na pet, sedam ili devet znamenki / decimala, rezultati očitani s logaritamskog računala bili su pouzdani na tri, najviše četiri znamenke, ovisno o mjestu na skali s kojeg su očitani. To odgovara točnosti rezultata na $\pm 0,1 \%$ što je za mnoge tehničke račune dovoljno točno, ali, npr., za geodeziju ili astronomiju nije.

Tijekom tristogodišnjeg razvoja logaritamskog računala taj se nedostatak nije mogao bitno promijeniti iako se pokušavalo na različite načine. Očitavanje položaja kazaljke s pomoću povećala samo je malo poboljšalo preciznost, veća

duljina skale također je malo pomogla, ali logaritamsko računalo postalo je predugo i nespretno za rukovanje. Uobičajene duljine skale bile su 12,5, 25 i 50 centimetara. Bilo je i drastičnog povećanja duljine skale njihovim “namotavanjem oko plašta cilindra”, ali čak ni skale duljine 12 do 18 metara nisu pružale točnost bolju od pete znamenke!

I drugo ograničenje logaritamskog računala, vezano uz svojstvo samih logaritama, bila je nemogućnost zbrajanja brojeva u području njihovih logaritama! Zbrajanje se moralo obaviti nekim drugim pomagalom. Već pred sam kraj razvoja i uporabe logaritamskih računala, oko 1960. godine, njemačka tvrtka *Faber&Castell* dodala je na poleđinu nekih modela svojih logaritamskih računala veličinom prilagođen adijator (zbrajalicu) tipa *Troncet*, ali taj pokušaj ostao je usamljen jer su ubrzo, nakon pojave elektroničkih kalkulatora, logaritamska računala potpuno izbačena iz uporabe.

Potreba za većom duljinom skale logaritamskog računala radi mogućnosti preciznijeg očitavanja, kod računala oblika ravnala dovela je do nespretnog rukovanja dugim štapom. Da se to izbjegne, skale su se umjesto na ravni štap nosile na okruglu ploču kao spirale ili na plašt cilindra kao zavojnice. Kako je spomenuto, takvo postizanje veće duljine skale nije baš jako povećalo inače slabu preciznost inherentnu analognim računskim spravama.

6. Analogna računala

U različitim područjima znanosti ili gospodarstva često se pojavljuju računski postupci koji sadrže jednu ili nekoliko formula za rješavanje jednog točno određenog problema kao što je, primjerice, preračunavanje mjernih jedinica u različitim mjernim sustavima, izračunavanje pada tlaka u cjevovodima, rješavanje Kirchhoffova zakona u strujnom krugu, zrakoplovna navigacija i slično. Potaknuti jednostavnošću uporabe logaritamskog računala, korisnici su smišljali njima slične naprave za rješavanje i takvih računa. Tako je nastao niz pomagala koja su čak i vizualno bila slična logaritamskim računalima (s tijelom, klizačem i kazaljkom).

Zanimljivo je da su s pojavom elektroničkih kalkulatora logaritamska računala do kraja sedamdesetih godina XX. stoljeća naglo nestala iz uporabe. Za razliku od toga, mnoga analogna računala nerijetko se još i danas koriste, pa čak i proizvode!

Nomogrami, dijagrami

Neke vrste formula bile su previše složene ili takvog oblika da nije bilo moguće smisliti pomagalo koje bi nalikovalo logaritamskom računalu. Za takve

probleme rješenje se moglo tražiti s pomoću tzv. nomograma ili dijagrama koji su sadržavali nekoliko skala. Za očitavanje nomograma bilo je potrebno ravnalo kojim su se povezivale točke na pojedinim skalama.

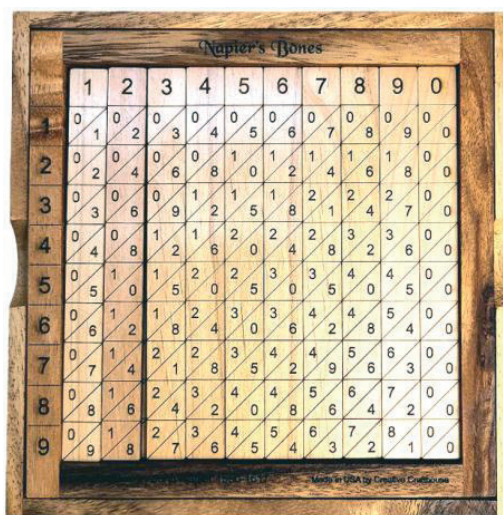
Zbog nešto manje spretnosti uporabe, nomogrami su bili manje popularni od klasičnih analognih računala i rjeđe u uporabi. Ipak, neki od njih i danas se gdje upotrebljavaju za brze približne račune.

7. Različita egzotična računaska pomagala

John Napier objavio je 1617. još jedan izum pomagala za množenje — tzv. Napierove šipke. U knjizi *Rabdologiae, seu Numerationis per Virgulas Libri Duo* (*Rabdologija, ili Dvije knjige o brojenju s pomoću šipki*) predstavio je način množenja brojeva s pomoću šipki kvadratnog presjeka na kojima su na svakoj stranici po duljini ispisane brojke na poseban način, tako da se slaganjem šipki jednu uz drugu brojevi mogu “pomnožiti” i umnožak očitati na samim šipkama, slika 17.

Taj izum nije bio pogodan za množenje višeznamenastih brojeva višeznamenkastim. Ako je množenik imao više jednakih znamenki, trebalo je za svaku takvu znamenku imati po jednu šipku, ili umjesto četvrtastih šipki koristiti okrugle s nizovima brojki ispisanih duž deset izvodnica.

Napierov izum “šipki” bio je kratka vijeka, a najvažniji je njegov spomen u Schickardovu računskom stroju.



Sl. 17.: Deset Napierovih (vertikalnih) šipki u okviru

8. Mehanički računski strojevi

Početak XVII. stoljeća, nekako u slično doba kad je počeo razvoj logaritamskih računskih pomagala (tablica i računala), počeo je i razvoj mehaničkih računskih strojeva. Povijesno gledano, javila se potreba za računskim pomagalima (navigacija, astronomija, geodezija i ostalo), a baš je nekako tad tehnološki razvoj dosegao potrebnu minimalnu razinu precizne izrade (pojava mehaničkih satova) potrebne za izradu mehaničkih računskih strojeva.

Iako se kroz tristotinjak godina razvoja pojavio velik broj vrlo različitih mehanizama, može se s oprezom reći da je osnovno načelo rada većine mehaničkih računskih strojeva to da se za svaku mjesnu vrijednost broja, tj. za svaku njegovu znamenku, jednim zupčanikom ili segmentom zupčanika na jednoj osovini pokreće drugi zupčanik ili segment zupčanika na drugoj osovini. Pomak prvog zupčanika povezan je s ulaznom znamenkom, a pomak drugog zupčanika s odgovarajućim rezultatom računanja. (Mehanički računski strojevi redovito su bili ‘digitalni’!)

Prvi se računski stroj pripisuje Nijemcu Wilhelmu Schickardu 1623. godine, ali taj je prototip nestao u požaru prije nego što je predstavljen javnosti. Ostali su samo crteži, prema kojima je 1960. na Sveučilištu u Tübingenu u Njemačkoj napravljena replika koja dokazuje funkcionalnost stroja. Schickardov stroj zapravo nije bio čisti mehanički računski stroj. Za zbrajanje i oduzimanje upotrebljavao je zupčanike, ali za množenje i dijeljenje služilo je zakretanje Napierovih šipki.

8.1. Zbrajalice (strojevi s dvjema računskim operacijama)

Godine 1642. glasoviti Blaise Pascal izumio je računski stroj – zbrajalicu, slika 18., temeljenu na nizu ozubljenih kotačića od kojih svaki označava jednu mjesnu vrijednost broja, a unutar vijenca ima devet rupica raspoređenih ukrug, u koje se umeće šiljak (*stilus*) kojim se svaki kotačić zakreće u smjeru kazaljke na satu (za pribrajanje) ili obratno (za oduzimanje). U izradi je bilo dosta problema zbog nedovoljne točnosti tadašnjih tehnologija, ali i zbog loše riješenog mehanizma prijenosa desetice na višu vrijednost. Iako je u “višim krugovima” izazvao velik interes, komercijalni je uspjeh izostao jer je prodano svega nekoliko primjeraka. Na temelju Pascalova izuma pojavilo se još nekoliko sličnih, primjerice, računski strojevi Engleza Samuela Morlanda, ali prenošenje desetice na višu vrijednost ostalo je velik problem u prvim mehaničkim strojevima. Zbrajalice na tom načelu sporadično su se proizvodile čak i nakon Drugog svjetskog rata, slika 19. Bile su razmjerno jeftine i služile su za pojedinačna računanja. Nisu bile pogodne za intenzivna zbrajanja, primjerice za računovodstva tvrtki, zbog sporog unosa brojeva i dosta izraženog trošenja prouzročenog trenjem.



Sl. 18.: Zbrajalica Blaisea Pascala iz 1652. godine, vlastoručno potpisana



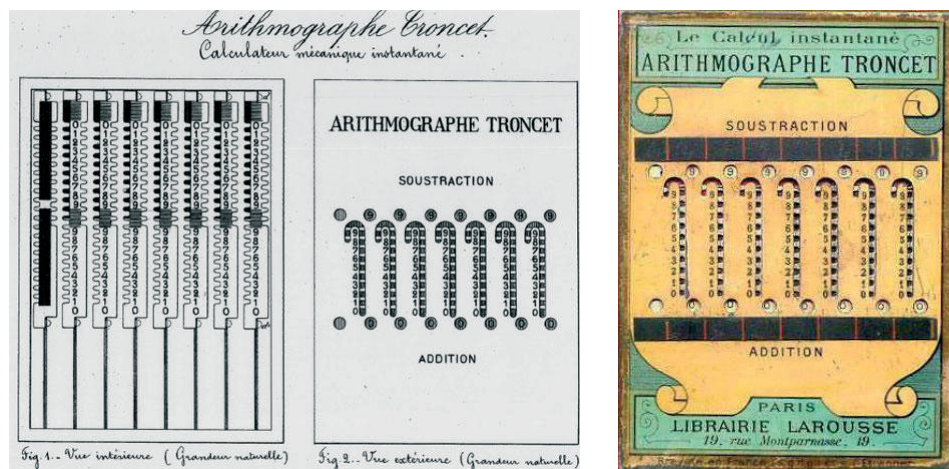
Sl. 19.: Zbrajalica Lightning iz 1942. godine

Tronceti

Slično je načelo (unos brojeva putem šiljka – *stilusa*), korišteno i u linear-nim zbrajalicama *Arithmographe*, popularno nazivanim ‘tronceti’ prema izumitelju Louisu Troncetu koji je takvu napravu patentirao 1889. godine, slika 20. Umjesto ozubljenog kotačića, svaku mjesnu vrijednost broja ovdje označava jedna dvostrano ozubljena traka koja se kroz prorez šiljkom pomiče dolje za zbrajanje ili gore za oduzimanje. Prenosanje desetice na višu vrijednost obavlja se elegantno, prevlačenjem šiljka preko “zavijutka”. I te su naprave bile podložne trošenju, ali jeftine i popularne, a proizvodile su se sve do pojave elektroničkih kalkulatora.

Tronceti su bili jedine mehaničke računske naprave džepnog formata sve do 1947. godine i pojave Curte, džepnog mehaničkog računskog stroja za četiri računske operacije, opisanog kasnije.

Iako povijest zbrajalica počinje od Pascalova izuma 1642. godine, do procvata njihova razvoja i proizvodnje dolazi od sredine XIX. stoljeća, s industrijskom revolucijom koja je i stvorila potrebu za njima (računovodstva sve većih



Sl. 20.: *Arithmographe* L. Tronceta – lijevo: slika iz patenta 1889., desno: prvi komercijalni primjerak

tvrtki sa sve većim prometom), ali i omogućila njihovu sve savršeniju proizvodnju kroz razvoj precizne mehanike.

Danas izgledaju možda smiješno zastarjeli, ali u ono doba bili su to pouzdani i trajni strojevi, kojima se moglo brzo zbrajati. Računovodstva velikih tvrtki imala su odjele s više desetaka, pa i stotina takvih strojeva na kojima su radile isključivo žene, slika 21. Čak su se organizirala natjecanja u brzom zbrajanju, slično kao i u brzom pisanju na pisaćem stroju. Neki su se modeli zadržali u uporabi sve do pojave elektroničkih kalkulatora pa je nerijetko spretan operator mehaničkog stroja bio mnogo brži od operatora elektroničkog kalkulatora zbog bržeg unosa brojeva.



Sl. 21.: Računski odjel američke državne institucije 1924. godine



Sl. 22.: Uredske zbrajalice s punom tipkovnicom – lijevo: zbrajalica tvrtke Burroughs, desno: zbrajalica Comptometer tvrtke Felt&Tarrant

Kod mnogih se zbrajalica unos brojeva obavljao preko tzv. pune tipkovnice, slika 23., na kojoj je za svaku mjesnu vrijednost unesenog broja postojala cijela kolona od devet tipki za znamenke od 1 do 9 (nula na nekoj mjesnoj vrijednosti jednostavno se nije unosila!), pa su se višeznamenkasti brojevi mogli unositi odjednom, poput sviranja akorda na glasoviru.

Iako je već 1902. zbrajalica Dalton imala tipkovnicu od deset tipki u dva reda, slika 24., tek je 1914. godine Oscar J. Sundstrand patentirao tipkovnicu s deset tipki kakvu i danas poznajemo, slika 25. Kod obiju tipkovnica brojke (i nula!) unosile su se uzastopno s lijeva nadesno pa je takav unos bio sporiji nego kod pune tipkovnice i mehanizam je bio složeniji, ali strojevi su mogli biti manjih dimenzija.

Vodeći u proizvodnji uredskih zbrajalica bili su proizvođači iz SAD-a, primjerice, Burroughs, Felt&Tarrant, slika 22., Dalton, ili National Cash Register Company u proizvodnji gotovinskih blagajni. Tipično za uredske strojeve, i uneseni brojevi i rezultati vrlo često su ispisivani na papirnatu traku radi kontrole.



Sl. 23.: Puna tipkovnica



Sl. 24.: Daltonova tipkovnica



Sl. 25.: Sundstrandova tipkovnica

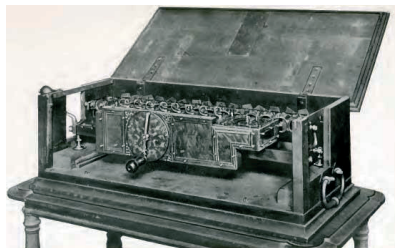
8.2. Strojevi s četiri računske operacije

Strojevi na načelu ozubljenog valjka (engl. *stepped drum*)

Njemački matematičar i filozof Gottfried Wilhelm Leibniz, potaknut Pascalovim izumom zbrajalice, odlučio je oko 1672. godine napraviti računski stroj koji može izvoditi sve četiri računske operacije. Mehanizam se temeljio na valjku na čijem se plaštu, usporedno s izvodnicama, nalazilo devet zubaca različite duljine, poredanih po veličini tako da je razvijeni plašt nalikovao na stube. Na osovini paralelnoj s valjkom nalazio se zupčanik pomičan duž valjka. Ovisno o mjestu po duljini valjka na kojem se zupčanik nalazi, pri jednom okretaju valjka on dolazi u zahvat s različitim brojem zubaca na valjku i tako se jednim punim okretajem valjka mogu predstaviti različiti brojevi od nula do devet. Takav set valjak-zupčanik bio je potreban za svaku znamenku broja kojim se računa. Iako je načelo rada stupnjevanog valjka očigledno, tražena preciznost izrade vrlo je visoka i čini se da je za Leibnizova života napravljeno samo nekoliko primjeraka, od kojih su do danas sačuvana samo dva, lijeva slika 26.

U sljedećih stoljeće i pol dogodio se velik broj pokušaja izrade računskog stroja, ali svi su ti strojevi bili vrlo komplicirani za rukovanje i tehnološki nedorađeni. Tek je Francuz Charles Xavier Thomas de Colmar sa svojim *Arithmometerom* uspio izraditi stroj koji je bio u stanju računske operacije obavljati točno i pouzdano kroz dulje vrijeme bez kvarova, što je osnovni preduvjet za komercijalni uspjeh. Od izuma 1820. do pune zrelosti stroja (oko 1851.) proteklo je više od trideset (!) godina, a proizvodio se još šezdesetak, negdje do 1914., desna slika 26. Načelo rada *Arithmometera* temeljilo se na Leibnizovu ozubljenom valjku (imao je po jedan valjak za svaku mjesnu vrijednost broja s kojim se računa). Najviše su se proizvodili modeli sa 12 do 20 znamenki rezultata, iako je bilo (u početku) modela sa 6 do 10 znamenki, a kao kuriozitet za izložbu u Parizu 1855. proizveden je i model s čak 30 znamenki.

Oko 1880. počele su europske tvrtke kopirati *Arithmometer*, a prije Prvog svjetskog rata to je činilo čak dvadesetak proizvođača.



Sl. 26.: lijevo: Leibnizov računski stroj (1672.); desno: Thomasov *Arithmometer* (1820.)



Sl. 27.: Dvije izvedbe ručnog mehaničkog stroja Curta: Curta I (1947. – 1970.) s kapacitetom 8/6/11 znamenki (desno) i Curta II (1953. – 1971.) s kapacitetom 11/8/15 znamenki (lijevo)

Razvoj računskih strojeva na Leibnizovu načelu ozubljenog valjka kulminirao je nakon Drugog svjetskog rata, 1947. godine izumom Kurta Herzstarka pod nazivom Curta, koji je bio savršenstvo precizne mehanike, slika 27.

Strojevi na načelu kotača s izvlačivim trnovima

Važan izum novog načela rada (kotač s trnovima, engl. *pinwheel*) dogodio se gotovo istodobno u SAD-u (Frank Stephen Baldwin, 1873.) i Europi (Willgodt Theophil Odhner, Sankt Peterburg, Rusija, 1874.). U tom se izumu promjenljiv broj zubaca ulaznog zupčanika postigao izvlačenjem odgovarajućeg broja trnova izvan oboda inače glatkog kotača, tako da pri jednom punom okretu njegove osovine na zakret sekundarnog zupčanika djeluju samo izvučeni trnovi, dakle, od nula do devet, kolika već treba biti znamenka na toj mjesnoj vrijednosti broja. Za svaku mjesnu vrijednost broja treba jedan takav kotač s trnovima, slika 28.



Sl. 28.: Računski strojevi tipa *pinwheel* – lijevo: Calcorex Tvornice računskih strojeva Zagreb (unos brojeva s pomoću polugica); desno: Facit C1-13 (unos brojeva preko Daltonove tipkovnice)

Dok je Odhnerov izum već 1890. ušao u proizvodnju i postigao veliku popularnost širom svijeta, a proizvodili su ga mnogi proizvođači u golemom broju primjeraka sve do sredine sedamdesetih godina XX. stoljeća, Baldwinov je patent čekao sve do 1911., kad ga je Jay Randolph Monroe III. kupio i osnovao tvrtku Monroe koja je od oko 1920. proizvodila računske strojeve sve do dolaska elektroničkih kalkulatora.

I strojevi Leibnizova i oni Odhnerova tipa zbrajali su i oduzimali brojeve izravno, zakretanjem glavnog vratila, a množenje i dijeljenje vršili su uzastopnim zbrajanjem, odnosno oduzimanjem. Zato je množenje, a pogotovo dijeljenje, bilo dugotrajna operacija koja je tražila dosta pažnje pri izvođenju. Da bi se te dvije operacije obavile brže i lakše, javljali su se mnogi pokušaji da se one obave izravno, jednim zakretom glavnog vratila. Jedan od najinovativnijih izumitelja / konstruktora novih računskih mehanizama u prvoj polovini XX. stoljeća bio je Nijemac Christel Hamann čiji strojevi i danas izazivaju divljenje.

8.3. Elektromehanički računski strojevi

Rad na mehaničkim računskim strojevima tražio je od operatera da snagom svojih ruku pokreće mehanizam, što je bilo dosta zamorno. Zato se odmah po izumu elektromotora, a posebno od dvadesetih godina XX. stoljeća, pojavljuju strojevi pokretani električnim motorom, što je opet dovelo do nekih novih ili bar dotjeranih metoda računanja.

Sa stanovišta operatera, uporaba elektromotora značila je da kod zbrajalica umjesto potezanja i vraćanja ručice treba samo pritisnuti jedan gumb za svaku operaciju zbrajanja ili oduzimanja. Slično i za množenje i dijeljenje, koje je prije tražilo višekratno zakretanje ručice, s elektromotorom je značilo znatno jednostavniji zahvat, gdje kad i samo jedan pritisak na gumb ili polugu. No, dijeljenje je ipak znatno složenija operacija od množenja pa neki strojevi, iako "moderni", nisu sve do sedamdesetih godina i kraja razvoja mehaničkih računskih strojeva imali automatsko dijeljenje!

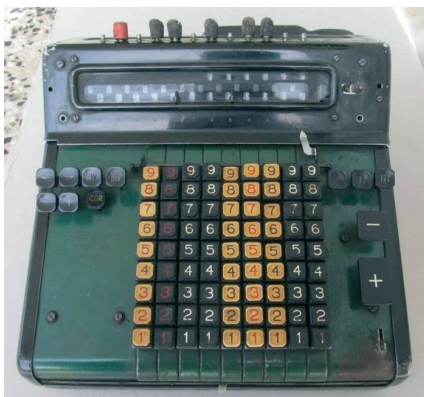
Na svojem su vrhuncu mehanički računski strojevi imali na tisuće dijelova i bili vrlo skupi. Poznat je i ilustrativan primjer stroja Olivetti Divisumma 24, slika 34., koji je 1956. u Italiji stajao 325 000 lira, kad je novi automobil Fiat 500 Nuova stajao 465.000 lira! Kad su se pojavili elektronički kalkulatori, zbog tisuća ugrađenih skupih tranzistora i dioda cijene su postale još više, pa je dobar stroj koštao na tisuće ondašnjih dolara, više i od dobrog automobila!



Sl. 29.: Remington Rand 99



Sl. 30.: TRS Zagreb, Zagreb Simplex



Sl. 31.: Mercedes Euklid Mod. 21 (C. Hamann)



Sl. 32.: Hamann Selecta



Sl. 33.: Rheinmetall SAR IIc



Sl. 34.: Olivetti Divisumma 24 (N. Capellaro)



Sl. 35.: Ekipa “ljudskih kompjutera” na djelu, NASA Dryden Research Center, 1949.



Sl. 36.: NACA Lewis Flight Propulsion Laboratory – “kompjuter” sa šiberom i Friden računskim strojem

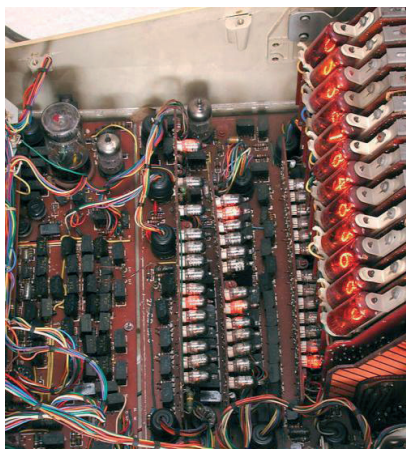
9. “Ljudski kompjuteri”

Mnogo godina, sve do izuma elektroničkih kalkulatora i kompjutera, usporedno su se upotrebljavali mehanički računski strojevi (za četiri računske operacije) i logaritamska računala ili logaritamske tablice (za izračunavanje transcendentnih funkcija). S bržim razvojem tehnike do kojeg je došlo između dva svjetska rata naglo je narasla potreba za intenzivnim računanjem pa je sporost rada mehaničkih računskih strojeva, ali i sporost prenošenja rezultata s jednog pomagala na drugo radi nastavka računanja, postala kočnica daljnjeg razvoja znanosti i tehnike.

Za računski vrlo zahtjevne probleme kao što su bili, npr., Projekt Manhattan ili obrada mjerenih podataka probnih letova aviona, formirale su se ekipe “kompjutera”, velikog broja ljudi koji su s pomoću takvih prvotnih računskih pomagala obavljali te složene zadatke razbijene na veći broj paralelnih zadataka. Iako se na taj način, pukim brojem ljudi koji su radili usporedno na istoj zadaći, računanje ubrzalo, ljudske su pogreške u računu bile i dalje prisutne. Tek su elektronička računska pomagala (kalkulatori i kompjuteri) dala računima, uz dotad neviđenu brzinu, i potpunu pouzdanost. Tako se danas uopće ne govori o mogućnosti da računalo pogriješi; ako se to i dogodi, to je sigurno posljedica ljudske pogreške, bilo kod unosa podataka, bilo kod pisanja programa za računalo.

10. Elektronički kalkulatori

Kako je tehnologija tijekom XX. stoljeća napredovala, a potrebe za brzim i točnim računanjem rasle, zastarjelost i sporost postojećih računskih pomagala



Sl. 37.: Sumlock Anita Mk 8 – pogled izvana (“puna tipkovnica”!) i iznutra (elektronske cijevi!)

postajala je sve očitija i tražili su se bolji načini računanja. Brzina električnih pojava (u usporedbi s mehaničkim) bila je uočljiva pa se javljaju prvi pokušaji realizacije električnog računskog pomagala. Prvi je bio, čini se, Nijemac Konrad Zuse 1935. s modelom Z1 i elektromagnetskim relejima i dvadesetak godina kasnije (1957.) japanska tvrtka Casio s modelom 14A. Sporost i nepouzdanost releja nije im davala prednost pa se pokušalo s elektronskim cijevima koje su načelno brže, ali ni one nisu bile pretjerano pouzdane, a trošile su goleme količine struje zbog vrućih katoda.

10.1. Prvi elektronički kalkulatori – stolni

Kao kuriozitet treba spomenuti da je 1961. godine engleska tvrtka Sumlock-Bell Punch, koja je dotad proizvodila mehaničke računske strojeve, proizvela prvi i jedini stolni kalkulator s minijaturnim elektronskim cijevima, model Anita Mk VII (i Mk 8), slika 37., koji je radio s dekadskim brojevnim sustavom i imao tzv. punu tipkovnicu poput mnogih mehaničkih strojeva.

Tek je izum poluvodičkih dioda i tranzistora 1948. dao nadu da elektroničko računsko pomagalo bude bitno bolje od mehaničkih. Nakon dosta godina razvoja poluvodičke industrije, 1964. se gotovo istodobno pojavilo nekoliko stolnih elektroničkih kalkulatora – američki Friden EC-130, slika 38., i Mathatron Mathatron slika 43., japanski Sharp Compet CS10A, slika 39. i Canon Canola 130, slika 40., talijanski IME 84, slika 41., njemački Olympia RAE 4/15, slika 42. Svi su oni sadržavali stotine i tisuće dioda i tranzistora i obavljali četiri računske operacije, a samo neki od njih i kvadratni korijen.



Sl. 38.: Friden EC-130



Sl. 39.: Sharp Compet CS10A



Sl. 40.: Canon Canola 130



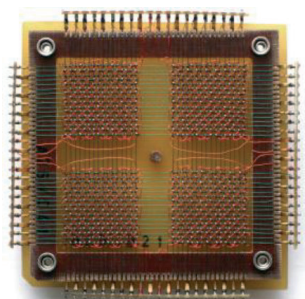
Sl. 41.: IME 84



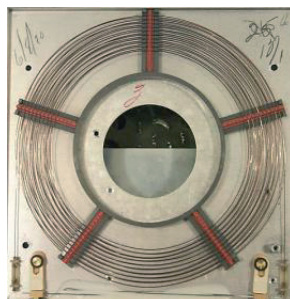
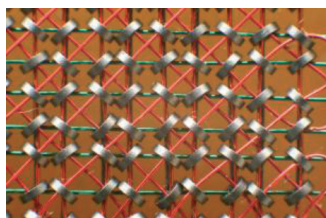
Sl. 42.: Olympia RAE 4/15



Sl. 43.: Mathatron Mathatron



Sl. 44.: 1024-bit ferrite core memory (cijela i uvećani dio)



Sl. 45.: Delay line memory

Problem je bio i prikaz rezultata – ekrani su mahom bili posuđeni iz onodobnih elektroničkih instrumenata. Tipični su bili ekrani sastavljeni od niza *nixie* cijevi (po jedna za svaku mjesnu vrijednost broja), staklenih ampula ispunjenih plinom neonom u kojoj je svakoj bilo deset žica, svaka savijena u obliku jedne od znamenki od ‘0’ do ‘9’, poredanih jedna iza druge. Da bi se za neku mjesnu vrijednost prikazala tražena znamenka, u određenoj je ampuli žica koja odgovara toj znamenci morala biti stavljena pod napon od oko 200 V i na površini te žice došlo bi do plinskog izboja narančaste boje koji je samo nju od svih žica učinio vidljivom. Korištene su i katodne cijevi poput onih u

osciloskopima, a neki kalkulatori (Mathatron) sve su brojeve i operatore ispisi-vali horizontalno duž uske papirnate trake.

I memorije su bile problem kao, uostalom, i u onodobnim kompjuterima druge generacije. Koristile su se memorije od pravokutne mreže žica na čijim su presjecištima bili feritni prstenčići (engl. *magnetic core memory*), slika 44., ili torzijske vibracije žica savijenih u kolute (engl. *delay line memory*), slika 45. Tipični kapaciteti tih ranih memorija bili su jedan ili nekoliko brojeva, a kod ranih programibilnih kalkulatora kapacitet memorije za brojeve i programske korake bio je nekoliko desetaka do nekoliko stotina bajta!

Uslijedilo je nekoliko godina ubrzanog razvoja s pojavom mnogih novih proizvođača i mnogo novih modela, ali i dalje s četiri računske operacije. Jedino je Wang LOCI-2 iz 1965., slika 47., mogao računati logaritme, a Hewlett-Packard HP-9100A iz 1968., slika 46., i sve ostale transcendentne funkcije.

Od samog početka nastojalo se u kalkulatore ugraditi mogućnost programiranja. Mathatron je već 1964. mogao obavljati kraće programe, 1965. to su mogli i Olivetti Programma 101 i Wang LOCI-2, a prvi doista doraden model s programiranjem bio je opet HP-9100A iz 1968., slika 46. Hewlett-Packard lansirao je 1971. i 1972. tri stolna programibilna kalkulatora: HP-9810A, slika 48., 9820A i 9830A, a zatim i niz sve boljih modela, pomalo brišući granicu između kalkulatora i kompjutera.

Osim tih vrhunskih modela, počela je i golema proizvodnja običnih stolnih kalkulatora za potrebe administrativnih poslova, poput računovodstva. Početni modeli nisu bili jeftini jer su sadržavali mnoge još uvijek skupe tranzistore i diode, ali ni adekvatni mehanički računski strojevi nisu bili jeftini. Elektronički su pružali prednost tihog rada i trajnosti.

Potencijalno tržište stolnih kalkulatora bilo je golemo, ali početna tehnologija značila je i visoku cijenu vrlo složenih aparata. Težnja za sniženjem cijena stolnih modela, ali i nastojanje da se proizvede što manji kalkulator koji bi bio prijenosan i stalno dostupan, dakle i na terenu, dovela je do nevjerojatno brzog tehnološkog razvoja svih komponenata kalkulatora i na kraju do vrlo moćnih džepnih kalkulatora.



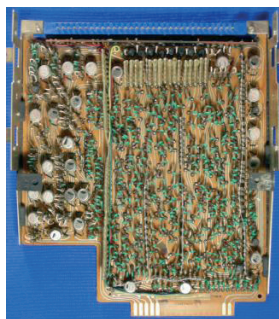
Sl. 46.: Hewlett-Packard
HP-9100A, 1968.



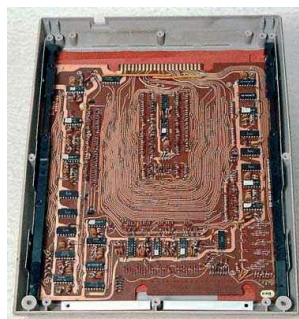
Sl. 47.: Wang LOCI-2,
1965.



Sl. 48.: Hewlett-Packard
HP-9810A, 1971.



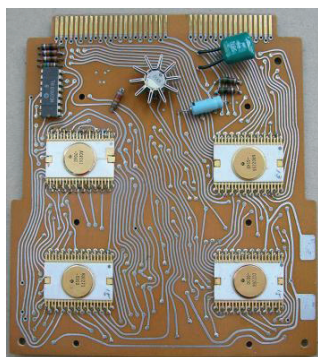
Sl. 49.: PCB s tranzistorima i diodama (Toshiba BC-1213, 1969.)



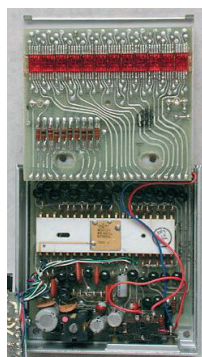
Sl. 50.: PCB s MSI čipovima (Canon Canola 1200, 1969.)

Golem tehnološki napredak

Sve do kraja šezdesetih godina kalkulatori su bili isključivo stolni (veliki), s velikim brojem dioda i tranzistora, slika 49. Iako su integrirani krugovi izumljeni 1958. (Jack S. Kilby iz tvrtke Texas Instruments) i 1959. (Robert Noyce iz tvrtke Fairchild), proizvođačima je trebalo više od deset godina da razviju pouzdanu i isplativu tehnologiju i proizvedu komercijalno dostupne integrirane krugove (čipove). Prednjačile su američke tvrtke Fairchild, Rockwell, National Semiconductor, Texas Instruments i još neke. Prvi integrirani krugovi sadržavali su samo desetak ili više komponenata (dioda ili tranzistora), nazvani su SSI (engl. *small scale integration*) i nisu pružali neku veliku prednost u odnosu na diskretne diode i tranzistore jer ih je trebalo i stotinjak za obavljanje svih kalkulatorskih funkcija. Sljedeća je generacija integriranih krugova – MSI (engl. *medium scale integration*), sadržavala sto ili više komponenata i oni su već dosta utjecali na konstrukciju tiskanih ploča kalkulatora (engl. *printed circuit*



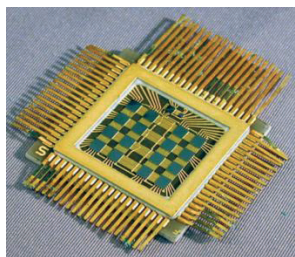
Sl. 51.: PCB s 4 LSI čipa (Sharp QT-8D, 1969.)



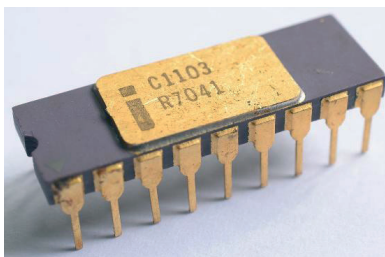
Sl. 52.: PCB s jednim čipom – (Busicom LE-120A, 1970.)



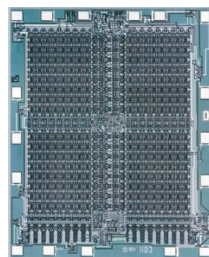
Sl. 53.: Sve je u jednom čipu (Commodore 796M, 1975.)



Sl. 54.: Fairchild SAM, 1024 bit (1968.)



Sl. 55.: 1024-bitni Intel 1103 memorijski čip, izvana i jezgra (1971.)



board – PCB), jer ih je nekoliko desetaka bilo dovoljno za kalkulatorske funkcije, slika 50.

Tek kad su se potkraj šezdesetih pojavili komercijalno dostupni čipovi s tisućama tranzistorsko / diodnih elemenata – LSI (engl. *large scale integration*), jedan ili svega nekoliko čipova bilo je dovoljno za sve kalkulatorske funkcije. Otvoren je put za izradu prvo “ručnih”, veličine npr. telefona, slika 51., a potom i “džepnih”, slike 52. i 53., kalkulatora.

Golemi su naponi ulagani u minijaturizaciju ostalih kalkulatorskih komponentata. Osim integriranih krugova koji su trebali zamijeniti tisuće tranzistora i dioda u logičkom dijelu kalkulatora, razvijale su se i tipkovnice, memorije i ekrani.

Najvidljivije, ali i tehnološki najmanje inovativne bile su tipkovnice. U početku preuzete iz pisaaćih strojeva, u stolnim su modelima više-manje i do danas zadržale svoju veličinu i funkcionalnost, a za džepne kalkulatore minijaturizacija je rezultirala dvjema glavnim vrstama tipki – onih s metalnom membranom i onih s gumenom membranom.

Razmjerno glomazne dotad korištene feritne memorije i vibrirajuće žice zamijenjene su memorijama u obliku integriranih krugova. Prvi proizvođači bili su Fairchild, Intel i Mostek oko 1969., slike 54. i 55., da bi kasnije Japan i Južna Koreja (Toshiba, Hitachi, Samsung i drugi) zavladaali tržištem.

Prvi minijaturni ekran Itron razvile su 1967. tvrtke Sharp i Iseden. Bio je to ekran s plavozelenim fluorescentnim izbojem na hladnoj katodi (engl. *vacuum fluorescent display* – VFD, sl. 56.). U početku je za svaku znamenku bila posebna ampula, a potom su, posebno za džepne modele, sve znamenke bile u zajedničkoj ampuli, slika 57. Ti su se ekrani proizvodili na Dalekom istoku, najviše u Japanu, stoga su bili razmjerno rijetki u američkim kalkulatorima.

Godine 1970. jedan laboratorij u sastavu američke kompanije Monsanto proizveo je prve ekrane od (crvenih) svjetlećih dioda, čije su znamenke bile vrlo sitne pa su ispred njih bile ugrađene leće, slika 59. Kasnije su ih proizvodili brojni, uglavnom američki, proizvođači kao što su Hewlett-Packard, Dialight, Fairchild, Litronix, Motorola, Bowmar i Texas Instruments.



Sl. 56.: Itron, prvi fluorescentni ekran (VFD) (Sharp QT-8D, 1969.)



Sl. 57.: Kasniji VFD ekran (1976.) (Canon Palmtronic F-31)



Sl. 58.: Burroughs Panaplex II ekran, neonski izboj na hladnoj katodi (Sanyo ICC-82D, 1971.)



Sl. 59.: Crveni LED ekran (Texas Instruments SR-50, 1974.)

Sve rane vrste ekrana bile su ‘aktivne’, odzračivale su svoju vlastitu svjetlost pa su za to trošile dosta energije. Prvi pasivni ekrani od tekućih kristala (engl. *liquid crystal display* – LCD), koji mogu reflektirati dozračenu svjetlost pa time i trošiti bitno manje struje, pojavili su se dosta rano. Već 1972. pojavila su se tri stolna kalkulatora s tekućim kristalima: Lloyd’s Accumatic 100, Sears C1 i Rapid Data Rapidman LC 208 (sve ih je proizvela, čini se, ista tvrtka: North American Rockwell Microelectronics Inc.). Ti ekrani nisu bili “štedni” jer su bili osvijetljivani običnom žaruljicom koja je trošila puno struje, slika 60.), a zbog velike nepouzdanosti brzo su povučeni na doradu! Godinu kasnije, 1973., japanski Sharp proizveo je prvi kalkulator s LCD ekranom, Sharp Elsimat EL-805 i još nekoliko modela, slika 61.). I oni su imali problema pa su također povučeni. Obje te vrste ekrana imale su bijele brojke na crnoj podlozi.

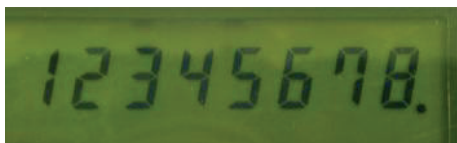
“Pravi” i pouzdani LCD ekrani javili su se 1976. i vrlo brzo, do 1980. godine, istisnuli sve ostale vrste ekrana u džepnim kalkulatorima većine



Sl. 60.: Sears C1 (Rockwellov LCD), 1972.



Sl. 61.: Sharp EL-805 ELSI MATE, 1973.



Sl. 62.: Žuti LCD, oko 1976.



Sl. 63.: Konačni LCD, od 1978.

svjetskih proizvođača. U početku su ti ekrani imali žutu foliju kao zaštitu od UV zraka, slika 62., ali ona je ubrzo nestala i ostali su samo poznati ekrani s crnim brojkama na sivoj podlozi, slika 63.

Koliko su te tehnološke inovacije značile za potrošnju struje, može ilustrirati podatak da su prvi stolni kalkulatori iz šezdesetih godina trošili od 50 do 100 W struje. Prosječni džepni kalkulatori iz 1975. s integriranim krugovima i VFD ili LED ekranima trošili su oko 0,5 W, a prosječni kalkulatori s LCD ekranima iz 1980. trošili su samo 0,0005 W struje! U odnosu na prve stolne modele to je smanjenje potrošnje energije od sto tisuća puta!

10.2. Prvi elektronički kalkulatori – ručni

Prvi ručni (engl. *hand-held*) kalkulator bio je japanski Sharp QT-8D micro Compet s jezgrom od četiri Rockwell čipa i ranim Sharpovim VFD ekranom s odvojenim ampulama za svaku znamenku, velik poput telefona i jedva da se mogao uzeti u ruku, slika 64. Imao je samo 15 velikih tipki preuzetih iz stolnih modela, za koje je na velikoj plohi bilo dovoljno mjesta. Proizveden je 1969., a stajao je 495 američkih dolara. Uz Sharp, mnogo se proizvođača uključilo u unosnu proizvodnju kalkulatora, a sve do kraja 1972., pa čak i 1973., još su se prodavali glomazni modeli veličine cigle, slika 65., često u luksuznim kutijama obloženim plišem i s cijenom koja se iskazivala u stotinama američkih dolara.

Veliki ekrani i još uvijek prisutne diskretne poluvodičke komponente (za pogon ekrana) tražili su puno struje pa se većina tih *hand-held* kalkulatora napajala iz mreže ili, ako su trebali biti prijenosni, iz četiri pa čak i šest baterija ili punjivih akumulatora veličine ‘C’ ili ‘D’.

No, napredak tehnologije bio je zapanjujuće brz i rezultirao je sve moćnijim čipovima i sve manjim ekranima, pa su se među “dinosaurima” sve češće vidali i znatno manji pa čak i džepni modeli, a cijene su brzo i drastično padale.



Sl. 64.: Sharp QT-8D micro Compet, 1969.



Sl. 65.: Sears C1, 1972.

10.3. Elektronički kalkulatori – džepni

Prvi stvarno džepni kalkulator proizvela je 1971. japanska tvrtka Busicom. Bio je to model LE-120 Handy s jednim integriranim krugom, slika 66., i crvenim LED ekranom sa 12 znamenki. Ta je tvrtka poznata po tome što je iz njezine suradnje s novoosnovanom tvrtkom Intel proizišao prvi mikroprocesor na svijetu, Intel 4004, koji je 1971. ugrađen u stolni kalkulator Busicom 141-PF.

Sve do 1972. svi su ti kalkulatori obavljali samo četiri računske operacije i možda kvadratni korijen, slika 67. Za ozbiljna računanja s transcendentnim funkcijama još uvijek je trebalo, uz kalkulator, koristiti i logaritamske tablice (ili logaritamsko računalo, ali ono je drastično smanjivalo preciznost računanja!).

I onda je, početkom 1972., tvrtka Hewlett-Packard lansirala prvi džepni kalkulator HP-35, slika 68., koji je imao sve potrebne funkcije i koji je mogao i najkompliciranije formule rješavati bez ispisivanja međurezultata, zahvaljujući tzv. obrnutoj poljskoj notaciji (RPN) i četirima radnim registrima! Bio je to nevjerojatan šok u znanstvenoj i inženjerskoj zajednici, a unatoč visokoj cijeni od ondašnjih 395 američkih dolara, u tri godine prodano je oko tristo tisuća primjeraka!

Trijumfalan pohod u područje džepnih kalkulatora Hewlett-Packard nastavio je 1973. s još boljim modelom HP-45, potom je 1974. u jednakom kućištu lansirao programibilni HP-65, slika 69., i tako svake godine poneki sve bolji model. Jedini proizvođač koji ih je bar pokušao pratiti bio je Texas Instruments, koji je 1974. lansirao model SR-50 sličan modelu HP-35, slika 70., i onda također u brzom ritmu niz znanstvenih i programibilnih kalkulatora, slike 71. i 72. Iako se njihova utrka malo usporila oko 1980. godine, obje su tvrtke ostale u tom biznisu i danas su među rijetkim proizvođačima vrhunskih kalkulatora.



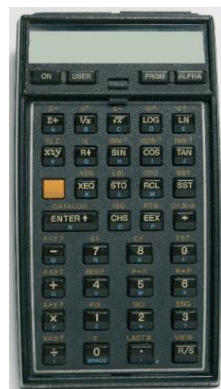
Sl. 66.: Busicom LE-120 Handy, 1970.



Sl. 67.: Bowmar 901B, 1971.



Sl. 68.: Hewlett-Packard HP-35, 1972.

Sl. 69.: HP-65,
1974.Sl. 70.: TI SR-50,
1974.Sl. 71.: TI-59,
1977.Sl. 72.: HP-41C,
1979.Sl. 73.: Sharp EL-8024
ELSI MATE, 1977.Sl. 74.: Olympia LCD 380
Lithium-Power, 1980.Sl. 75.: Hewlett-Packard
HP-42S, 1988.

Sve ostale tvrtke, a bilo ih je na stotine, jako su zaostajale za njima, bar što se tiče znanstvenih i programibilnih kalkulatora, iako je među njima bilo i nekoliko tehnološki vrlo naprednih proizvođača, primjerice Sharp, Casio, Canon... Te su tri tvrtke, zajedno s Hewlett-Packardom i Texas Instrumentsom, do danas ostale u najužem krugu eminentnih proizvođača.

Kraj sedamdesetih i početak osamdesetih godina obilježila je ofenziva LCD ekrana s tekućim kristalima i s tim povezan kraj “velikih” (veličine AA ili AAA) baterija i NiCd akumulatora koje je trebalo zamjenjivati ili dopunjavati svakih nekoliko dana i uvođenje “malih” (gumbastih) baterijica koje su u stanju kalkulator pokretati mjesecima i godinama, slike 73., 74. i 75.

U to doba došlo je do još jedne bitne novine – kako je tehnologija izrade integriranih krugova sve brže napredovala, nove generacije VLSI (engl. *very large scale integration*) i ULSI (engl. *ultra...*) čipova omogućile su izradu sve

boljih ‘stolnih kompjutera’, koji su u nadolazećem razdoblju, s razvojem kapaciteta i programske podrške, bili u stanju preuzeti sve veći dio računanja koja su dotad obavljali kalkulatori. To se odnosi prije svega na programibilne kalkulare kojima su veća memorija, ali i neusporedivo bolje sučelje kompjutera oduzeli glavni dio posla i ostavili samo pojedinačne račune ili najjednostavnije ponavljajuće račune za koje se ne isplati pisati program.

Pokušaj odupiranja toj sudbini napravio je Casio 1985. godine, lansirajući grafički i programibilni kalkulator Casio fx-7000G, slika 76., koji je imao rasterizirani LCD ekran sa 96×64 točkica (piksela), na kojem je mogao, osim do 16 brojki ili slova u osam redova, prikazivati i grafove funkcija u koordinatnom sustavu. Slijedili su, naravno, i ostali važni proizvođači sa svojim sličnim modelima. Danas se grafički i programibilni kalkulatori smatraju vrhuncem u svojoj kategoriji, bolji su od svojih prethodnika s početka osamdesetih, ali ne više bitno. Iako bi tehnologija danas bez problema omogućila enormno veću memoriju za rješavanje iznimno kompliciranih problema, takvi se kalkulatori ne proizvode jer za takve probleme imamo cijenom pristupačne kompjutere s neusporedivo boljim sučeljem.

Ostatak proizvodnje čine “obični” (neprogramibilni) znanstveni kalkulatori, slika 77., i kalkulatori s četiri računske operacije, slika 78. Osim što su tehnološki savršeniji od nekadašnjih, pa i osjetno jeftiniji, nisu bitno različiti od njih – ono što se može danas njima izračunati, moglo se i onda, možda samo malo sporije.

Gledajući unazad, prošlo je gotovo šezdeset godina od prvog stolnog elektroničkog kalkulatora (Anita Mk. VII, 1961.) i oko pedeset godina od prvog ručno-džepnog kalkulatora (Sharp QT-8D, 1969.) – malo više od jednog radnog vijeka čovjeka! U tom je razdoblju došlo do nezamislivog tehnološkog razvoja računskih pomagala koji je, ustvari, bitno promijenio cijelu ljudsku civilizaciju.



Sl. 76.: Casio fx-7000G, 1985.



Sl. 77.: Canon F-789SGA



Sl. 78.: Sharp ELSI MATE EL 240S

Uzme li se u obzir da je razvoj kalkulatora bio najbrži negdje od početka pa do kraja sedamdesetih godina, dakle trajao je samo oko deset godina, i da je nakon toga težište prebačeno na razvoj kompjutera, cijela priča još je impresivnija.

Od logaritamskog računala i mehaničkog računskog stroja, čiji je razvoj trajao tristotinjak godina, u svega petnaestak godina (od otprilike 1965. do otprilike 1980.) način računanja nezamislivo se promijenio. Iz razdoblja kad je računanje bilo sporo i zamorno i tražilo dosta operaterova znanja i napora, ušlo se u razdoblje kad je računanje postalo jednostavno tipkanje bez fizičkog i mentalnog napora, a s brzim i pouzdanim rezultatom. Može se reći da se brzina računanja enormno povećala i da je zapravo kočnica postala operaterova fizička sposobnost da brojeve utipka u kalkulator te očita i ispiše rezultate. Samo računanje, kakva god bila operacija, kalkulator obavlja tako brzo da se može smatrati trenutačnim.

Povećanje brzine računanja omogućeno elektroničkim računskim pomagalicama posebno je uočljivo kod kompjutera, gdje je izbjegnuta najsporija i najnepouzdanija faza kalkulatora – ručni unos brojeva i ispis rezultata. Primjerice, logaritamske tablice, koje su nekad računale stotine ljudi i to nekoliko godina, danas bi najobičniji PC kompjuter, jednom programiran, izračunao i ispisao vjerojatno u vremenu koje se mjeri sekundama ili najviše minutama!

No, takav fantastičan napredak, osim pozitivnih strana, ima i posljedicu oko koje se mišljenja razilaze: dok su nekadašnji operateri, osim strpljenja, a gdje kad i fizičke snage, morali imati i dosta znanja i nekoliko trikova “u rukavu”, za računanje s pomoću kalkulatora ne treba ništa od toga. Većina današnjih korisnika ne treba pa i nema nikakav osjećaj za brojeve i njihov red vrijednosti. Zato se i može dogoditi, a i događa se, da u nekim situacijama neka pogreška (npr. pogrešno utipkan broj ili decimalni zarez utipkan na krivom mjestu), rezultira pogrešnim redom vrijednosti rezultata, a da to operater ni ne primijeti! Takve se pogreške nekadašnjim operaterima nisu često događale.

Zajedničko svim ranijim računskim pomagalicama bilo je to da su većinu računa obavljala s mantisama brojeva, a da je položaj decimalnog zareza morao odrediti operater. Iznimke su bile uredske zbrajalice (obično dva decimalna mjesta) i tzv. log-log skale na logaritamskim računalima. Od samog su početka elektronički kalkulatori uzimali u račun i decimalni zarez.

Logično je da se od početka osamdesetih godina, čim je tehnološki razvoj integriranih krugova to omogućio, prionulo razvoju kompjutera koji, za opsežnije računske zadatke, izbjegava baš te dvije kritične faze – unos ulaznih podataka i izlaz dobivenih rezultata. Ne treba zaboraviti da je ljudsko računanje bilo popraćeno neizbježnim pogreškama koje kod kompjutera praktički ne postoje. No, to je druga, još impresivnija tema.

Zaključak

Računska pomagala oduvijek su bila prilagođena potrebama računanja u skladu s djelatnostima i raspoloživim tehnologijama. Nagli rast znanosti i tehnike u drugoj polovini XX. stoljeća doveo je do potreba za sve bržim računanjem radi obrade sve veće količine mjerenih podataka, ali i omogućio je potpuno novu i dotad nezamislivu tehnologiju brzog računanja. U usporedbi s nekoliko tisuća godina “vladanja” abakom i tristo godina usporednog korištenja logaritamskih računala i mehaničkih računskih strojeva, nekoliko desetaka godina razvoja elektroničkih računskih pomagala nevjerojatno je kratko razdoblje, u kojem je potpuno izmijenjena slika računanja, ali i svijeta u cjelini.

Literatura (izvori podataka, dostupno 10. 9. 2020.)

Od davnina:

<https://www.rechnen-ohne-strom.de/> – Široki pregled svih vrsta računskih pomagala “bez struje”

Logaritamska računala:

<http://sliderulemuseum.com/> – International Slide Rule Museum

<http://www.oughtred.org/> – Oughtred Society

<http://www.rechenschieber.org/>

<http://www.sliderules.info/index.htm>

<http://sliderules.lovett.com/>

<http://sliderule.ozmanor.com/index.html>

<http://www.sliderule.it/>

Analogna računala:

<https://www.rechenschieber-werbemittel.de/>

<https://prof.beuth-hochschule.de/heimann/rechenschieber-fuer-das-bauwesen/wasserbau/>

Mehanički računski strojevi:

<http://www.rechnerlexikon.de/wiki.phtml> – Više od 6000 jedinica!

<http://www.ifhb.de/Rechenmaschinen.php> – podaci o čak 1809 modela mehaničkih računskih strojeva

<http://www.rechenmaschinen-illustrated.com/> – web-stranica bazirana na knjizi Ernsta Martina *Die Rechenmaschinen* iz 1925.

<http://www.storiaolivetti.it/> – mehanički računski strojevi i elektronički kalkulatori talijanske tvrtke Olivetti

<http://public.beuth-hochschule.de/hamann/> – mehanički računski strojevi
<http://www.w-hasselo.nl/mechn/index.php> – mehanički računski strojevi
<http://www.curtamania.com/curta/code/home.html> – ručni Curta mehanički računski stroj i elektronički kalkulatori
<http://retrocalculators.com/> – sve vrste računskih pomagala
<http://www.mechanicalcalculator.com/> – mehanički računski strojevi
<http://history-computer.com> – širok pregled svih vrsta računskih pomagala
<http://www.mechrech.info/> – povijesni pregled najstarijih računskih pomagala
<http://www.officemuseum.com/> – stara uredska oprema, uključujući uredske računske strojeve

Elektronički kalkulatori:

<http://www.calcuseum.com/> – najopsežnija baza podataka o svim elektroničkim kalkulatorima (više od 10 000 modela!)

<http://www.hpmuseum.org/> – najopsežnija baza podataka o elektroničkim kalkulatorima Hewlett-Packard

<http://www.datamath.org/> – najopsežnija baza podataka o elektroničkim kalkulatorima Texas Instruments

<http://www.casio-calculator.com/> – najopsežnija baza podataka o elektroničkim kalkulatorima Casio

<http://www.vintagecalculators.com/> – opsežan povijesni pregled razvoja elektroničkih kalkulatora

<http://www.oldcalculatormuseum.com/index.html> – stolni elektronički kalkulatori

<http://www.johnwolff.id.au/index.htm> – opsežna baza podataka o mehaničkim računskim strojevima i elektroničkim kalkulatorima

<http://www.leningrad.su/museum/> – sovjetski kalkulatori Sergej Frolov

<http://www.rskey.org/CMS/> – programibilni džepni kalkulatori

<http://www.rechenkasten.de> – stolni elektronički kalkulatori

<http://computermuseum.informatik.uni-stuttgart.de/cm002.html>

http://www.epocalc.net/pages/mes_calcs_01.htm

<http://ernst.mulder.com/calculators/>

<http://web.tiscali.it/city/@calculators.htm>

<http://www.decadecounter.com/vta/tubelist.php>