

NOTATKI DO ĆWICZEŃ Z ANALIZY ZESPOŁONEJ

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\oint_{\Gamma} dz \frac{e^{1/z}}{1+z}.$$

w której kontur Γ jest okręgiem o środku w zerze i promieniu równym 2 (kółko na symbolu całki oznacza, że jest to całka po konturze zamkniętej).

Rozwiązanie: Funkcja podcałkowa $f(z)$ ma biegun prosty w $z = -1$ oraz punkt istotnie osobliwy w $z = 0$.

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=-1} = 1/e.$$

Residuum w $z = 0$ najłatwiej znaleźć przez “inspekcję”, wypisując odpowiednie szeregi:

$$f(z) = e^{1/z}(1+z)^{-1} = \left(1 + \frac{1}{1!}z + \frac{1}{2!}z^2 + \frac{1}{3!}z^3 + \dots\right) (1 - z + z^2 - z^3 + \dots).$$

Wymnażając je widzimy, że współczynnik przy $1/z$ jest dany szeregiem

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=0} &= \frac{1}{1!} - \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} - \frac{1}{4!} + \dots \\ &= 1 - \left(1 + \frac{(-1)^1}{1!} + \frac{(-1)^2}{2!} + \frac{(-1)^3}{3!} + \frac{(-1)^4}{4!} + \dots\right) = 1 - e^{-1}. \end{aligned}$$

Zatem suma residuów w $z = -1$ i $z = 0$ jest równa 1 i

$$\int_{\Gamma} dz \frac{e^{1/z}}{1+z} = 2\pi i.$$

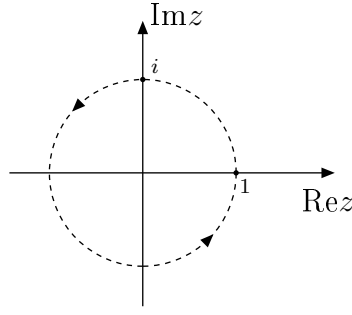
Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a - \sin \theta}, \quad |a| > 1.$$

Rozwiązanie: Warunek $|a| > 1$ zapewnia, że całka jest dobrze określona - mianownik nigdzie się nie zeruje. Całkę tę można obliczyć konwencjonalnie (co zrobimy dalej), ale można też przez residua. W tym celu podstawiamy $z = e^{i\theta}$, tak że zmienna z przebiega teraz zbiór liczb zespolonych o module równym 1. Wówczas $dz = ie^{i\theta}d\theta = izd\theta$, więc

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a - \sin \theta} = \oint_{|z|=1} \frac{dz}{iz} \frac{1}{a - (1/2i)(z - 1/z)} = -2 \oint_{|z|=1} \frac{dz}{z^2 - 2iaz - 1}.$$



Rysunek 1: Kontur całkowania w płaszczyźnie zmiennej zespolonej z .

Zamknięty kontur całkowania, o równaniu $|z| = 1$, pokazany na rysunku 1, jest tu obiegany przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara. Skorzystaliśmy tu ze wzoru

$$\sin \theta = \frac{1}{2i} (e^{i\theta} - e^{-i\theta}).$$

Mianownik pod całką jest dwumianem i można go zapisać w postaci

$$z^2 - 2iaz - 1 = (z - z_+)(z - z_-),$$

w której

$$z_{\pm} = i \left(a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right),$$

są dwoma pierwiastkami równania $z^2 - 2iaz - 1 = 0$. Funkcja podcałkowa ma zatem dwa bieguny proste (pierwszego rzędu) w $z = z_-$ i w $z = z_+$. Przyjmijmy na razie, że $a > 1$. W takim przypadku $|z_+| > 1$ ale z_- leży wewnątrz konturu, gdyż $|z_-| < 1$. Zatem zgodnie z twierdzeniem o residuach,

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a - \sin \theta} &= 2\pi i \operatorname{res} \frac{-2}{(z - z_+)(z - z_-)} \Big|_{z=z_-} \\ &= \frac{-4\pi i}{z_- - z_+} = \frac{-4\pi i}{-2i\sqrt{a^2 - 1}} \\ &= \frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - 1}}. \end{aligned}$$

Dla $a < -1$, gdy wyjściowa całka jest też dobrze określona, wewnątrz konturu $|z| = 1$ znalazłby się pierwiastek z_+ dwumianu i mielibyśmy

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a - \sin \theta} &= 2\pi i \operatorname{res} \frac{-2}{(z - z_+)(z - z_-)} \Big|_{z=z_+} \\ &= \frac{-4\pi i}{z_+ - z_-} = \frac{-4\pi i}{2i\sqrt{a^2 - 1}} \\ &= -\frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - 1}}, \end{aligned}$$

jak też i powinno być, gdyż funkcja podcałkowa jest wtedy stale ujemna.

Konwencjonalnie dokonaliśmy w wyjściowej całce podstawienia

$$t = \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}, \quad d\theta = \frac{2dt}{1+t^2}, \quad \cos \theta = \frac{1}{1+t^2}, \quad \sin \theta = \frac{2t}{1+t^2},$$

co sprowadziłoby ją do

$$\begin{aligned} \frac{2}{a} \int \frac{dt}{t^2 - (2/a)t + 1} &= \frac{2}{a} \int \frac{dt}{(t - 1/a)^2 + (a^2 - 1)/a^2} \\ &= \frac{2a}{a^2 - 1} \int \frac{dt}{\left[\frac{at}{\sqrt{a^2 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 - 1}} \right]^2 + 1} \\ &= \frac{2}{\sqrt{a^2 - 1}} \operatorname{arctg} \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 - 1}} \left(t - \frac{1}{a} \right) \right]. \end{aligned}$$

Gdy θ przebiega od 0 do 2π , wówczas $t = \operatorname{tg}(\theta/2)$ biegnie od 0 do $+\infty$ osiąganą, gdy $\theta \rightarrow \pi$ (od strony wartości mniejszych), a następnie od $-\infty$ (gdy θ przekracza π) do 0 osiąganego, gdy $\theta = 2\pi$. Zatem gdy θ dochodzi od zera do π funkcja $I(\theta)$

$$\begin{aligned} I(\theta) &\equiv \int_0^\theta \frac{d\varphi}{a - \sin \varphi} \\ &= \frac{2}{\sqrt{a^2 - 1}} \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 - 1}} \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{a} \right) \right] - \operatorname{arctg} \left[-\frac{1}{\sqrt{a^2 - 1}} \right] \right\} \end{aligned}$$

dochodzi (dla $a > 0$) do wartości

$$\begin{aligned} I(\pi) &= \frac{2}{\sqrt{a^2 - 1}} \left\{ \operatorname{arctg}(+\infty) - \operatorname{arctg} \left[-\frac{1}{\sqrt{a^2 - 1}} \right] \right\} \\ &= \frac{2}{\sqrt{a^2 - 1}} \left\{ \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left[-\frac{1}{\sqrt{a^2 - 1}} \right] \right\} \end{aligned}$$

i po przekroczeniu przez φ wartości π (gdy $\operatorname{tg}(\theta/2)$ nagle spada do $-\infty$) nie powinna (jako całka z funkcji dodatniej!) zmaleć. Pokazuje to, że po drugiej stronie punktu $\theta = \pi$ należy wybrać tę gałąź funkcji arctg , na której

$$\operatorname{arctg}(-\infty) = -\frac{\pi}{2} + \pi$$

(a nie $-\pi/2$). Na tej drugiej gałęzi wartością funkcji

$$\operatorname{arctg} \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 - 1}} \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{a} \right) \right]$$

odpowiadającą $\theta = 2\pi$ jest

$$\operatorname{arctg} \left[-\frac{1}{\sqrt{a^2 - 1}} \right] + \pi$$

i stąd otrzymujemy

$$I(2\pi) \equiv \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a - \sin \theta} = \frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - 1}},$$

tak jak metodą wykorzystującą residua. Powtarzając powyższą analizę dla $a < 0$ otrzymamy oczywiście ten sam wynik z przeciwnym znakiem.

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a + \cos \theta}, \quad |a| > 1.$$

Rozwiązanie: Warunek $|a| > 1$ zapewnia, że całka jest dobrze określona - mianownik nigdzie się nie zeruje. Dokonując jak w poprzednim przykładzie podstawienia $z = e^{i\theta}$ i korzystając ze wzoru

$$\cos \theta = \frac{1}{2} (e^{i\theta} + e^{-i\theta}),$$

sprowadzamy całkę do

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a + \cos \theta} = \frac{2}{i} \oint_{|z|=1} \frac{dz}{z^2 + 2az + 1}.$$

Pierwiastkami dwumianu w mianowniku pod całką są teraz

$$z_+ = -a + \sqrt{a^2 - 1}, \quad z_- = -a - \sqrt{a^2 - 1},$$

z czego, gdy $a > 0$, tylko z_+ leży wewnątrz konturu $|z| = 1$. Zatem

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a + \cos \theta} = \frac{2}{i} \frac{2\pi i}{z_+ - z_-} = \frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - 1}}.$$

Dla $a < -1$ wewnątrz konturu $|z| = 1$ leżałby pierwiastek z_- i wynikiem całki byłoby $-2\pi/\sqrt{a^2 - 1}$ (wyjściowa funkcja podcałkowa byłaby wtedy stałe ujemna).

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(1 + b \cos \theta)^2}, \quad |b| < 1.$$

Rozwiązanie: Warunek $|b| < 1$ zapewnia, że całka jest dobrze określona - mianownik nigdzie się nie zeruje. Dokonując tak jak w poprzednich przykładach podstawienia $z = e^{i\theta}$ mamy

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(1 + b \cos \theta)^2} &= \oint_{|z|=1} \frac{dz}{iz} \frac{1}{[1 + (b/2)(z + 1/z)]^2} \\ &= \frac{4}{ib^2} \oint_{|z|=1} \frac{dz z}{[z^2 + (2/b)z + 1]^2}. \end{aligned}$$

Podobnie jak poprzednio mianownik można zapisać w postaci $[(z - z_+)(z - z_-)]^2$, gdzie

$$z_{\pm} = \frac{1}{b} \left(-1 \pm \sqrt{1 - b^2} \right),$$

przy czym dla $0 < b < 1$ tylko $|z_+| < 1$, tj. wewnątrz konturu $|z| = 1$ funkcja podcałkowa ma jeden biegun drugiego rzędu w $z = z_+$. Obliczamy residuum $f(z)$ w tym punkcie:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=z_+} &= \left. \frac{d}{dz} \frac{z}{(z - z_-)^2} \right|_{z=z_+} = \frac{1}{(z_+ - z_-)^2} - \frac{2z_+}{(z_+ - z_-)^3} \\ &= -\frac{z_+ + z_-}{(z_+ - z_-)^3} = \frac{b^2}{4(1 - b^2)^{3/2}}. \end{aligned}$$

Stąd

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(1 + b \cos \theta)^2} = \frac{4}{ib^2} 2\pi i \frac{b^2}{4(1 - b^2)^{3/2}} = \frac{2\pi}{(1 - b^2)^{3/2}}.$$

Ten sam wynik samo można uzyskać korzystając z całki obliczonej w poprzednim zadaniu:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(1 + b \cos \theta)^2} &= \frac{1}{b^2} \left[-\frac{\partial}{\partial a} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{a + \cos \theta} \right]_{a=1/b} \\ &= \frac{1}{b^2} \left[-\frac{\partial}{\partial a} \frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - 1}} \right]_{a=1/b} = \frac{2\pi}{b^2} \left[\frac{a}{(a^2 - 1)^{3/2}} \right]_{a=1/b} \\ &= \frac{b}{|b|} \frac{2\pi}{(1 - b^2)^{3/2}}. \end{aligned}$$

Całkę tę można oczywiście obliczyć stosując konwencjonalne podstawienie, ale z uwagi na drugą potęgę w mianowniku jest to znacznie bardziej skomplikowane (z tym, że podstawienie $t = \operatorname{tg}(\theta/2)$ daje funkcję pierwotną, a metoda residuów stosuje się tylko do całki w granicach od 0 do 2π).

Zadanie

Metodą residuów obliczyć całkę

$$I = \int_0^{2\pi} d\theta \frac{\sin^2 \theta}{a + b \cos \theta}, \quad 0 < |b| < |a|.$$

Podać także wynik całki

$$\int_0^{2\pi} d\theta \frac{\sin^2 \theta}{1 + a^2 - 2a \cos \theta}.$$

Rozwiązanie: Podstawiamy standardowo $z = e^{i\theta}$ i otrzymujemy

$$I = -\frac{1}{2} \oint_{|z|=1} \frac{dz}{iz} \frac{(z - 1/z)^2}{2a + b(z + 1/z)} = \frac{i}{2b} \oint_{|z|=1} dz \frac{(z^2 - 1)^2}{z^2(z^2 + 2(a/b)z + 1)}.$$

Funkcja podcałkowa ma jeden biegun drugiego rzędu w $z = 0$ oraz dwa bieguny proste w $z_{\pm} = -(a/b) \pm \sqrt{(a/b)^2 - 1}$, z których, jeśli $a/b > 0$ tylko z_+ znajduje się wewnątrz konturu (z_- , gdy $a/b < 0$). Jej residua w $z = z_+$ oraz w $z = z_-$ znajdujemy standardowo:

$$\begin{aligned}\operatorname{res} f(z)|_{z=z_+} &= \frac{(z_+ - 1/z_+)^2}{z_+ - z_-} = 2\sqrt{(a/b)^2 - 1}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=z_-} &= \frac{(z_- - 1/z_-)^2}{z_- - z_+} = -2\sqrt{(a/b)^2 - 1}.\end{aligned}$$

Residuum w $z = 0$ (biegun drugiego rzędu) najłatwiej znaleźć dokonując rozwinięcia:

$$f(z) = \frac{1 - 2z^2 + z^4}{z^2} \left(1 - 2\frac{a}{b}z - z^2 + \dots\right) = \frac{1}{z^2} - 2\frac{a}{b}\frac{1}{z} + \dots$$

Tak więc zgodnie z twierdzeniem o residuach otrzymujemy

$$I = \frac{i}{2b} 2\pi i \left(-2\frac{a}{b} \pm 2\sqrt{\frac{a^2}{b^2} - 1}\right) = \frac{2\pi}{b} \left(\frac{a}{b} \mp \sqrt{\frac{a^2}{b^2} - 1}\right),$$

gdzie górny (dolny) znak odnosi się do $a/b > 0$ ($a/b < 0$).

Z powyższego wyniku, podstawiając $a \rightarrow 1 + a^2$ i $b \rightarrow -2a$, otrzymujemy

$$\int_0^{2\pi} d\theta \frac{\sin^2 \theta}{1 + a^2 - 2a \cos \theta} = \begin{cases} \pi/a^2 & \text{gdy } |a| > 1 \\ \pi & \text{gdy } |a| < 1 \end{cases}.$$

Zadanie

Metodą residuów obliczyć całkę

$$I = \int_0^{2\pi} d\theta \frac{\cos^2 3\theta}{1 + a^2 - 2a \cos 2\theta}.$$

Rozpatrzyć przypadki $|a| < 1$ oraz $|a| > 1$.

Rozwiązanie: Podstawiamy standardowo $z = e^{i\theta}$ i otrzymujemy

$$I = \frac{i}{4a} \oint_{|z|=1} dz \frac{(z^6 + 1)^2}{z^5 (z^4 - \frac{1+a^2}{a}z^2 + 1)}.$$

Biegun w $z = 0$ jest piątego rzędu i jego residuum najłatwiej znaleźć metodą rozwinięcia:

$$\begin{aligned}f(z) &= \frac{(z^6 + 1)^2}{z^5} \left\{1 + \left(\frac{1+a^2}{a}z^2 - z^4\right) + \left(\frac{1+a^2}{a}z^2 - z^4\right)^2 + \dots\right\} \\ &= \frac{1}{z^5} \left\{1 + \frac{1+a^2}{a}z^2 + \left[\left(\frac{1+a^2}{a}\right)^2 - 1\right]z^4 + \dots\right\},\end{aligned}$$

czyli że

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=0} = \left(\frac{1+a^2}{a} \right)^2 - 1.$$

Pozostałe bieguny są w punktach będących pierwiastkami równania bikwadratowego, które - jak można od razu dostrzec - ma prostą postać:

$$z^4 - \frac{1+a^2}{a} z^2 + 1 = (z^2 - a) \left(z^2 - \frac{1}{a} \right) = 0.$$

Zatem, gdy $|a| < 1$ funkcja $f(z)$ ma wewnątrz konturu $|z| = 1$ dwa bieguny proste w $z_{\pm}^2 = a$, gdy zaś $|a| > 1$, dwa bieguny proste w $z_{\pm}^2 = 1/a$.

Rozpatrzmy najpierw przypadek $0 < a < 1$. Oba residua, w $z = \sqrt{a}$ oraz w $z = -\sqrt{a}$ są takie same:

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\pm\sqrt{a}} = \frac{(a^3+1)^2}{2a^2(a^2-1)}.$$

Podobnie takie same są residua w $z = i\sqrt{|a|}$ i w $z = -i\sqrt{|a|}$, gdy $|a| < 1$ i $a < 0$; są one wtedy też równe:

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\pm i\sqrt{|a|}} = -\frac{(a^3+1)^2}{2a^2(a-1/a)|a|} = \frac{(a^3+1)^2}{2a^2(a^2-1)},$$

gdyż $-|a|/a = 1$ dla $a < 0$.

Gdy $|a| < 1$ mamy zatem dla obu znaków a

$$\begin{aligned} I &= \frac{i}{4a} 2\pi i \left\{ \left(\frac{1+a^2}{a} \right)^2 - 1 + \frac{(a^3+1)^2}{2a^2(a^2-1)} \right\} \\ &= \frac{-\pi}{2a^3} \left\{ 1 + a^2 + a^4 + \frac{(1+a^3)(1+a)(1-a+a^2)}{(a+1)(a-1)} \right\} \end{aligned}$$

i ostatecznie po uporządkowaniu, gdy $|a| < 1$, znajdujemy, że

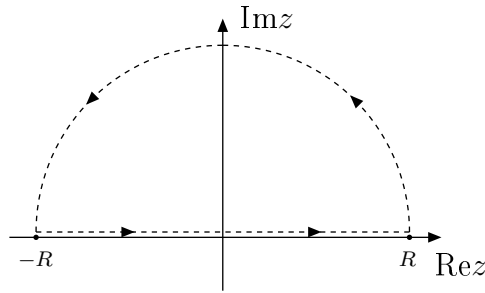
$$\int_0^{2\pi} d\theta \frac{\cos^2 3\theta}{1+a^2-2a\cos 2\theta} = \pi \frac{1-a+a^2}{1-a}.$$

Gdy $|a| > 1$, zarówno, gdy $a > 0$, jak i gdy $a < 0$, dostajemy residua w punktach $z^2 = 1/a$ równe

$$\operatorname{res} f(z)|_{z^2=\pm 1/a} = \frac{(a^3+1)^2}{2a^2(1-a^2)}.$$

i wobec tego

$$I = \frac{-\pi}{2a^3} \left\{ 1 + a^2 + a^4 - \frac{(1+a^3)(1+a)(1-a+a^2)}{(a+1)(a-1)} \right\}.$$



Rysunek 2: Kontur Γ składający się z odcinka długości $2R$ leżącego symetrycznie na osi rzeczywistej domkniętego dużym półkołem o promieniu $R \rightarrow \infty$ w górnej półpłaszczyźnie.

Po uporządkowaniu mamy więc dla $|a| > 1$ wzór¹

$$\int_0^{2\pi} d\theta \frac{\cos^2 3\theta}{1 + a^2 - 2a \cos 2\theta} = \pi \frac{1 - a + a^2}{a^3(a - 1)}.$$

Zadanie

Korzystając z twierdzenia o residuach obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{x^2}{(x^2 + a^2)^3}.$$

Rozwiązanie: Ponieważ funkcja podcałkowa jest parzysta, rozciągamy najpierw całkowanie na całą oś rzeczywistą (i bierzemy połowę tego, co wyjdzie). Następnie metodą residuów obliczamy całkę

$$\int_\Gamma dz f(z) = \int_\Gamma dz \frac{z^2}{(z^2 + a^2)^3}$$

po konturze Γ pokazanym na rysunku 2. Mamy więc:

$$\int_\Gamma dz f(z) = \int_{-R}^R dx \frac{x^2}{(x^2 + a^2)^3} + \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=+i|a|},$$

jako że funkcja $f(z)$ ma wewnątrz konturu Γ jeden biegun trzeciego rzędu w punkcie $z = i|a|$ (bierzemy $R > |a|$).

Całka po półokręgu o promieniu R , na którym $z = R e^{i\varphi}$, znika w granicy $R \rightarrow \infty$:

$$\begin{aligned} \left| \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) \right| &= \left| \int_0^\pi d\varphi i R e^{i\varphi} \frac{R^2 e^{2i\varphi}}{(R^2 e^{2i\varphi} + a^2)^3} \right| \\ &\leq \int_0^\pi d\varphi \left| i R e^{i\varphi} \frac{R^2 e^{2i\varphi}}{(R^2 e^{2i\varphi} + a^2)^3} \right| = \int_0^\pi d\varphi \frac{R^3}{|R^2 e^{2i\varphi} + a^2|^3}. \end{aligned}$$

¹Oba wzory końcowe można sprawdzić programem *Mathematica*, najlepiej dla jakichś konkretnych wartości parametru a ; w ogólnym przypadku program ten daje mało czytelny wynik.

W tym miejscu korzystamy z nierówności²

$$|w_1 \pm w_2| \geq ||w_1| - |w_2||,$$

która pozwala dokończyć szacowanie (zastępujemy $|R^2 e^{2i\varphi} + a^2|$ w mianowniku czynnikiem mniejszym, tj. $|R^2 e^{2i\varphi} - |a^2||$):

$$\left| \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) \right| \leq \int_0^\pi d\varphi \frac{R^3}{(R^2 - a^2)^3} = \frac{\pi R^3}{(R^2 - a^2)^3}.$$

Pokazuje ono, że gdy $R \rightarrow \infty$, całka po półokręgu znika jak $1/R^3$.

Trzeba jeszcze obliczyć residuum funkcji w $z = i|a|$. Mamy

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= \frac{1}{2!} \frac{d^2}{dz^2} \frac{z^2}{(z + i|a|)^3} = \frac{1}{2!} \frac{d}{dz} \left[\frac{2z}{(z + i|a|)^3} - \frac{3z^2}{(z + i|a|)^4} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{2}{(z + i|a|)^3} - \frac{12z}{(z + i|a|)^4} + \frac{12z^2}{(z + i|a|)^5} \right]_{z=i|a|} = \frac{-i}{16|a|^3}. \end{aligned}$$

Zatem

$$\int_0^\infty dx \frac{x^2}{(x^2 + a^2)^3} = \frac{1}{2} 2\pi i \frac{-i}{16|a|^3} = \frac{\pi}{16|a|^3}.$$

W przypadku tej całki mogliśmy byli równie dobrze zamknąć biegnący po osi rzeczywistej kontur całkowania przez dołączenie półokręgu o promieniu $R \rightarrow \infty$ leżącego w dolnej półpłaszczyźnie (zamiast półokręgu w górnej półpłaszczyźnie): ponieważ taki kontur byłby obiegany zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, całka by była równa $-2\pi i$ razy residuum w punkcie $z = -i|a|$:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} &= \frac{1}{2!} \frac{d^2}{dz^2} \frac{z^2}{(z - i|a|)^3} = \frac{1}{2!} \frac{d}{dz} \left[\frac{2z}{(z - i|a|)^3} - \frac{3z^2}{(z - i|a|)^4} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{2}{(z - i|a|)^3} - \frac{12z}{(z - i|a|)^4} + \frac{12z^2}{(z - i|a|)^5} \right]_{z=-i|a|} = \frac{+i}{16|a|^3}. \end{aligned}$$

Wynik jest oczywiście taki sam jak poprzednio.

Zadanie

Korzystając z twierdzenia o residuach obliczyć całkę

$$\int_{-\infty}^\infty dx \frac{x^2 - x + 2}{x^4 + 10x^2 + 9}.$$

²Dowód: dla dowolnych dwu liczb w_1 i w mamy nierówność $|w_1 + w| \leq |w_1| + |w|$. Podstawiamy $w = \pm w_2 - w_1$, co daje $|w_2| \leq |w_1| + |w_1 \mp w_2|$. Zatem dowolne dwie liczby w_1 i w_2 spełniają nierówność $|w_1 \mp w_2| \geq |w_2| - |w_1|$, nawet gdy $|w_2| > |w_1|$; ponieważ można dokonać zamiany $w_1 \leftrightarrow w_2$ więc prawą stronę nierówności można zastąpić modulem.

Rozwiązanie: Całka jest zbieżna, bo dla $|x| \rightarrow \infty$ funkcja podcałkowa zachowuje się jak $1/x^2$. Ponadto jest jasne, że mianownik funkcji podcałkowej nie zeruje się nigdy dla rzeczywistych wartości x . Całkę tę można obliczyć tak jak poprzednią, całkując funkcję

$$f(z) = \frac{z^2 - z + 2}{z^4 + 10z^2 + 9} = \frac{z^2 - z + 2}{(z^2 + 1)(z^2 + 9)},$$

po konturze pokazanym na rysunku 2, lub podobnym konturze składającym się z osi rzeczywistej i półokręgu w dolnej półpłaszczyźnie. Przyjmijmy jednak kontur Γ z rysunku 2. Podobnie jak w poprzednim zadaniu pokazujemy, że gdy $R \rightarrow \infty$, całka po półokręgu dąży do zera:

$$\begin{aligned} \left| \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) \right| &\leq \int_0^\pi d\varphi \frac{R |R^2 e^{2i\varphi} - R e^{i\varphi} + 2|}{|R^4 e^{4i\varphi} + 10R^2 e^{2i\varphi} + 9|} \\ &\leq \int_0^\pi d\varphi \frac{R(R^2 + R + 2)}{R^4 - 10R^2 - 9} \sim \frac{1}{R} \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Funkcja podcałkowa ma cztery bieguny dla $z_{1,2}^2 = -1$ i $z_{3,4}^2 = -9$, z czego dwa, w $z_1 = i$ oraz $z_3 = 3i$ leżą (dla dostatecznie dużego R) wewnątrz konturu całkowania. Zatem zgodnie z twierdzeniem o residuach

$$\oint_{\Gamma} f(z) = 2\pi i (\operatorname{res} f(z)|_{z=i} + \operatorname{res} f(z)|_{z=3i}).$$

Obliczamy residua:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i} &= \lim_{z \rightarrow i} \frac{z^2 - z + 2}{(z + i)(z^2 + 9)} = \frac{1 - i}{16i}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=3i} &= \lim_{z \rightarrow i} \frac{z^2 - z + 2}{(z^2 + 1)(z + 3i)} = \frac{7 + 3i}{48i}. \end{aligned}$$

Zatem w granicy $R \rightarrow \infty$ otrzymujemy

$$\oint_{\Gamma} f(z) \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{x^2 - x + 2}{x^4 + 10x^2 + 9} = 2\pi i \left(\frac{3 - 3i}{48i} + \frac{7 + 3i}{48i} \right) = \frac{5}{12} \pi.$$

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{x^6}{(x^4 + a^4)^2}.$$

Rozwiązanie: Tu zastosujemy podejście fizyczne i przeskalujemy zmienną całkowania, żeby od razu uwidocznili zależność od a i mniej pisać. Mamy więc, po standardowym

wykazaniu, że całka po półokręgu będącym częścią zamkniętego konturu Γ z rysunku 2 znika w granicy $R \rightarrow \infty$,

$$\int_0^\infty dx \frac{x^6}{(x^4 + a^4)^2} = \frac{1}{2|a|} \oint_\Gamma dz \frac{z^6}{(z^4 + 1)^2} = \frac{2\pi i}{2|a|} \sum_{\text{Im} z_i > 0} \text{res } f(z)|_{z=z_i}.$$

Z czterech pierwiastków czwartego stopnia z -1 , które są położeniami czterech biegunów drugiego rzędu funkcji podcałkowej, dwoma leżącymi w górnej półpłaszczyźnie, a więc wewnątrz konturu, są

$$z_1 = e^{i\frac{\pi}{4}} = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \quad \text{oraz} \quad z_2 = e^{i\frac{3\pi}{4}} = \frac{-1+i}{\sqrt{2}},$$

przy czym $z_1^2 = i$, a $z_2^2 = -i$. W celu obliczenia residuów w tych biegunach wygodnie jest zapisać funkcję podcałkową w postaci

$$f(z) = \frac{z^6}{(z - z_1)^2 (z - z_2)^2 (z^2 + i\sqrt{2}z - 1)^2}.$$

Korzystamy ze standardowego wzoru:

$$\begin{aligned} \text{res } f(z)|_{z=z_1} &= \frac{d}{dz} \frac{z^6}{(z - z_2)^2 (z^2 + i\sqrt{2}z - 1)^2} \Big|_{z=z_1} \\ &= \frac{6z_1^5}{(z_1 - z_2)^2 (z_1^2 + i\sqrt{2}z_1 - 1)^2} \\ &\quad - \frac{2z_1^6}{(z_1 - z_2)^3 (z_1^2 + i\sqrt{2}z_1 - 1)^2} \\ &\quad - \frac{2z_1^6(2z_1 + i\sqrt{2})}{(z_1 - z_2)^2 (z_1^2 + i\sqrt{2}z_1 - 1)^3}. \end{aligned}$$

Residuum w $z = z_2$ jest dane analogicznym wzorem, którym $z_1 \leftrightarrow z_2$. Ponieważ $z_1 - z_2 = \sqrt{2}$, $z_{1,2}^4 = -1$, a $z_1^2 + i\sqrt{2}z_1 - 1 = -2(1 - i)$, $z_2^2 + i\sqrt{2}z_2 - 1 = -2(1 + i)$, mamy

$$\begin{aligned} \text{res } f(z)|_{z=z_1} &= \frac{-6z_1}{2[-2(1 - i)]^2} - \frac{-2i}{2\sqrt{2}[-2(1 - i)]^2} - \frac{-2i(2z_1 + i\sqrt{2})}{2[-2(1 - i)]^3}, \\ \text{res } f(z)|_{z=z_2} &= \frac{-6z_2}{2[-2(1 + i)]^2} - \frac{2i}{-2\sqrt{2}[-2(1 + i)]^2} - \frac{2i(2z_2 + i\sqrt{2})}{2[-2(1 + i)]^3}. \end{aligned}$$

Sumując odpowiadające sobie wyrazy parami i uwzględniając, że $(1 \pm i)^2 = \pm 2i$ oraz że $z_1 + z_2 = i\sqrt{2}$, znajdujemy że

$$\sum_{\text{Im} z_i > 0} \text{res } f(z)|_{z=z_i} = \frac{3\sqrt{2}}{8i} + 0 + \frac{3\sqrt{2}i}{16} = -i \frac{3\sqrt{2}}{16}.$$

Zatem

$$\int_0^\infty dx \frac{x^6}{(x^4 + a^4)^2} = \frac{2\pi i}{2|a|} \left(-i \frac{3\sqrt{2}}{16} \right) = \frac{3\sqrt{2}\pi}{16|a|}.$$

Zadanie

Obliczyć całkę

$$J = \int_{-\infty}^\infty \frac{dx}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)^2}.$$

Rozwiązanie: Jak zwykle rozciągamy całkowanie wzdłuż osi rzeczywistej na półokrąg o promieniu R domykający kontur całkowania w górnej półpłaszczyźnie zespolonej zmiennej z , co umożliwia zastosowanie twierdzenia o residuach. Funkcja podcałkowa

$$f(z) = \frac{1}{(z^2 + a^2)(z^2 + b^2)^2} \equiv \frac{1}{(z + i|a|)(z - i|a|)(z + i|b|)^2(z - i|b|)^2},$$

ma wewnątrz tego konturu jeden biegun prosty w $z = i|a|$ i jeden biegun drugiego rzędu w $z = i|b|$. Residua tych biegunów znajdujemy standardowo:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= \frac{1}{2i|a|(b^2 - a^2)^2}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=i|b|} &= \frac{d}{dz} \frac{1}{(z^2 + a^2)(z + i|b|)^2} \Big|_{z=i|b|} \\ &= \left[\frac{-2z}{(z^2 + a^2)^2(z + i|b|)^2} - \frac{2}{(z^2 + a^2)(z + i|b|)^3} \right] \Big|_{z=i|b|} \\ &= \frac{i}{2(a^2 - b^2)^2|b|} - \frac{i}{4(a^2 - b^2)|b|^3}. \end{aligned}$$

Mamy zatem

$$\begin{aligned} J &= 2\pi i \left\{ \frac{-i}{2(b^2 - a^2)^2|a|} + \frac{i}{2(a^2 - b^2)^2|b|} - \frac{i}{4(a^2 - b^2)|b|^3} \right\} \\ &= 2\pi i \left\{ \frac{i(|a| - |b|)}{2(a^2 - b^2)^2|a||b|} - \frac{i}{4(a^2 - b^2)|b|^3} \right\} \\ &= 2\pi i \left\{ \frac{2i|b|^2}{4(a^2 - b^2)(|a| + |b|)|a||b|^3} - \frac{i|a|(|a| + |b|)}{4(a^2 - b^2)(|a| + |b|)|a||b|^3} \right\} \\ &= -\frac{\pi}{2} \frac{2b^2 - a^2 - |a||b|}{(a^2 - b^2)(|a| + |b|)|a||b|^3} = -\frac{\pi}{2} \frac{(|b| - |a|)(2|b| + |a|)}{(a^2 - b^2)(|a| + |b|)|a||b|^3}. \end{aligned}$$

Zatem ostatecznie

$$\int_{-\infty}^\infty \frac{dx}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)^2} = \frac{\pi(2|b| + |a|)}{2(|a| + |b|)^2|a||b|^3}.$$

Zadanie.

Obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\cos x}{x^2 + a^2}.$$

Rozwiązanie: Ponieważ cosinus jest funkcją parzystą możemy zamiast powyższej całki obliczać

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^\infty dx \frac{\cos x + i \sin x}{x^2 + a^2} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^\infty dx \frac{e^{ix}}{x^2 + a^2},$$

bo całka z sinusa da zero (całka z funkcji nieparzystej w symetrycznych granicach). Aby obliczyć tę całkę całkujemy funkcję

$$f(z) = \frac{e^{iz}}{z^2 + a^2},$$

po zamkniętym konturze Γ pokazanym na rysunku 2. Na półokręgu $z = R e^{i\varphi}$ i

$$\begin{aligned} \left| \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) \right| &= \left| \int_0^\pi d\varphi i R e^{i\varphi} \frac{e^{iR \cos \varphi} e^{-R \sin \varphi}}{R^2 e^{2i\varphi} + a^2} \right| \\ &\leq R \int_0^\pi d\varphi \frac{e^{-R \sin \varphi}}{|R^2 e^{2i\varphi} + a^2|} \leq R \int_0^\pi d\varphi \frac{e^{-R \sin \varphi}}{R^2 - a^2} = 2 R \int_0^{\pi/2} d\varphi \frac{e^{-R \sin \varphi}}{R^2 - a^2} \\ &\leq 2 R \int_0^{\pi/2} d\varphi \frac{e^{-2(R/\pi)\varphi}}{R^2 - a^2} = \frac{\pi}{(R^2 - a^2)} (1 - e^{-R}). \end{aligned}$$

Wykorzystana tu została nierówność $\sin \varphi \geq 2\varphi/\pi$ słuszna dla $0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2}\pi$. Widać zatem, że całka po tym fragmencie konturu Γ dąży do zera w granicy $R \rightarrow 0$. Zauważmy też, że w rozpatrywanym tu przypadku całka po półokręgu domykającym kontur w dolnej półpłaszczyźnie *nie* znikałaby w tej granicy. Dlatego kontur trzeba było domknąć półokręgiem w górnej półpłaszczyźnie. Ogólnie, tzw. Lemat Jordana orzeka, że w przypadku funkcji postaci

$$f(z) = R(z) e^{iaz},$$

gdzie $R(z)$ jest funkcją wymierną znikającą dla $z \rightarrow \infty$ conajmniej jak $1/z$, jeśli $\operatorname{Re} a > 0 (< 0)$, w granicy $R \rightarrow \infty$ znika całka po półokręgu w górnej (dolnej) półpłaszczyźnie.

Ponieważ w granicy $R \rightarrow 0$ całka po tym półokręgu znika, otrzymujemy z twierdzenia o residuach związek

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^\infty dx \frac{e^{ix}}{x^2 + a^2} = \pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|},$$

jako że wewnątrz konturu Γ z rysunku 2 funkcja $f(z)$ ma tylko jeden punkt osobliwy w $z = i|a|$. Residuum funkcji $f(z)$ w tym punkcie znajdujemy standardowo

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} = \frac{e^{-|a|}}{2i|a|}.$$

Ostatecznie więc

$$\int_0^\infty dx \frac{\cos x}{x^2 + a^2} = \frac{\pi}{2|a|} e^{-|a|}.$$

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_{-\infty}^\infty dx \frac{\cos x}{(x^2 + a^2)^3}.$$

Rozwiązanie: Postępujemy tak, jak w poprzednim zadaniu, tj. całkujemy po konturze z rysunku 2 funkcję

$$f(z) = \frac{e^{iz}}{(z^2 + a^2)^3}.$$

Ponieważ zgodnie z lematem Jordana całka po półokręgu znika w granicy $R \rightarrow \infty$, a wewnątrz konturu funkcja ma tylko jeden punkt osobliwy w $z = i|a|$, otrzymujemy związek

$$\int_{-\infty}^\infty dx \frac{e^{ix}}{(x^2 + a^2)^3} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|}.$$

Biegun w $z = i|a|$ jest trzeciego rzędu, więc

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= \frac{1}{2} \left[\frac{d^2}{dz^2} \frac{e^{iz}}{(z + i|a|)^3} \right]_{z=i|a|} = \frac{1}{2} \left[\frac{d}{dz} \frac{i e^{iz}}{(z + i|a|)^3} - \frac{3e^{iz}}{(z + i|a|)^4} \right]_{z=i|a|} \\ &= \frac{e^{-|a|}}{2} \left(\frac{-1}{(2i|a|)^3} - \frac{6i}{(2i|a|)^4} + \frac{12}{(2i|a|)^5} \right) = \frac{e^{-|a|}}{2} \left(\frac{-i}{8|a|^3} + \frac{-3i}{8a^4} + \frac{-3i}{8|a|^5} \right). \end{aligned}$$

Zatem

$$\int_{-\infty}^\infty dx \frac{\cos x}{(x^2 + a^2)^3} = \frac{\pi}{8|a|^5} (a^2 + 3|a| + 3) e^{-|a|}.$$

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\cos x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)}.$$

Otrzymać też wynik dla $|a| = |b|$.

Rozwiązanie: Całkując to co trzeba po konturze z rysunku 2 i znajdując residua dwu biegunów prostych położonych wewnątrz konturu otrzymujemy dla $|a| \neq |b|$ wynik

$$\int_{-\infty}^\infty dx \frac{\cos x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = \frac{\pi}{b^2 - a^2} \left(\frac{e^{-|a|}}{2|a|} - \frac{e^{-|b|}}{2|b|} \right).$$

Wynik dla $|a| = |b|$ najłatwiej otrzymać zauważając, że

$$\begin{aligned} \lim_{|a| \rightarrow |b|} \frac{\pi}{(|b| + |a|)(|b| - |a|)} \left(\frac{e^{-|a|}}{2|a|} - \frac{e^{-|b|}}{2|b|} \right) &= -\frac{\pi}{2|a|} \frac{d}{d|a|} \left(\frac{e^{-|a|}}{2|a|} \right) \\ &= \frac{\pi}{2a^2} \left(1 + \frac{1}{|a|} \right) e^{-|a|}. \end{aligned}$$

Zatem

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{\cos x}{(x^2 + a^2)^2} = \frac{\pi}{2a^2} \left(1 + \frac{1}{|a|} \right) e^{-|a|}.$$

Zadanie

Obliczyć całki

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{x \cos x}{x^2 - 2x + 10}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{x \sin x}{x^2 - 2x + 10}.$$

Rozwiązanie: Obie całki można otrzymać całkując funkcję

$$f(z) = \frac{z e^{iz}}{z^2 - 2z + 10} = \frac{z e^{iz}}{(z - z_1)(z - z_2)},$$

gdzie $z_1 = 1+3i$, $z_2 = 1-3i$ są dwoma pierwiastkami równania kwadratowego $z^2+2z+10=0$, po konturze z rysunku 2. Zgodnie z lematem Jordana całka po półokręgu o promieniu R znika w granicy $R \rightarrow \infty$ i otrzymujemy

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{x e^{ix}}{x^2 - 2x + 10} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_1} = 2\pi i \frac{(1+3i)e^{-3+i}}{6i}.$$

Rozkładając prawą stronę na część rzeczywistą i urojoną znajdujemy, że

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{x \cos x}{x^2 - 2x + 10} &= \frac{\pi}{3e^3} (\cos 1 - 3 \sin 1), \\ \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{x \sin x}{x^2 - 2x + 10} &= \frac{\pi}{3e^3} (3 \cos 1 + \sin 1). \end{aligned}$$

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^{\infty} dx \frac{x \sin x}{(x^2 + a^2)^2}.$$

Rozwiązanie: Biorąc jako kontur Γ oś rzeczywistą domkniętą półokręgiem o promieniu $R \rightarrow \infty$ w górnej półpłaszczyźnie (patrz rys. 2) piszemy

$$\begin{aligned}\int_{\Gamma} dz \frac{z e^{iz}}{(z^2 + a^2)^2} &= \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{x \cos x + ix \sin x}{(x^2 + a^2)^2} + \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) \\ &= 2i \int_0^{\infty} dx \frac{x \sin x}{(x^2 + a^2)^2} + \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z),\end{aligned}$$

(całka z cosinusem daje zero bo funkcja podcałkowa jest nieparzysta - ten sam wniosek wyniknie także z tego, że dana przez residuum całka $\oint dz f(z)$ będzie czysto urojona). Z drugiej strony całka po Γ jest równa

$$2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|}.$$

W punkcie $z = i|a|$ jest biegun drugiego rzędu, więc

$$\begin{aligned}\operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= \left. \frac{d}{dz} \frac{z e^{iz}}{(z + i|a|)^2} \right|_{z=i|a|} \\ &= \frac{e^{-|a|}}{(2i|a|)^2} - \frac{|a| e^{-|a|}}{(2i|a|)^2} - \frac{2i|a| e^{-|a|}}{(2i|a|)^3} = \frac{e^{-|a|}}{4|a|}.\end{aligned}$$

Zatem

$$2i \int_0^{\infty} dx \frac{x \sin x}{(x^2 + a^2)^2} + \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) = 2\pi i \frac{e^{-|a|}}{4|a|}.$$

Trzeba pokazać jeszcze, że w granicy $R \rightarrow \infty$ druga całka znika: mamy tam $z = R e^{i\varphi}$:

$$\begin{aligned}\left| \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) \right| &= \left| \int_0^{\pi} d\varphi i R e^{i\varphi} \frac{R e^{i\varphi} \exp(iR \cos \varphi - R \sin \varphi)}{(R^2 e^{2i\varphi} + a^2)^2} \right| \\ &\leq R^2 \int_0^{\pi} d\varphi \frac{e^{-R \sin \varphi}}{|R^2 e^{2i\varphi} + a^2|^2} \leq R^2 \int_0^{\pi} d\varphi \frac{e^{-R \sin \varphi}}{(R^2 - a^2)^2},\end{aligned}$$

(w ostatnim kroku użyta została nierówność $|z \pm w| \geq ||z| - |w||$). Można teraz wykorzystać słuszną dla $0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2}\pi$ nierówność $\sin \varphi \geq 2\varphi/\pi$ i napisać

$$R^2 \int_0^{\pi} d\varphi \frac{e^{-R \sin \varphi}}{(R^2 - a^2)^2} \leq \frac{2R^2}{(R^2 - a^2)^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi e^{-2R\varphi/\pi} = \frac{2R^2}{(R^2 - a^2)^2} \frac{\pi}{2R} (1 - e^{-R}).$$

Dla $R \rightarrow \infty$ całka jest więc tłumiona przez czynnik $1/R^3$ i znika.³ Ostatecznie więc

$$\int_0^{\infty} dx \frac{x \sin x}{(x^2 + a^2)^2} = \frac{\pi e^{-|a|}}{4|a|}.$$

³Zauważmy, że w tym przypadku nie można konturu biegnącego po osi rzeczywistej domknąć półokręgiem w *dolnej* półpłaszczyźnie: jak łatwo sprawdzić, z powodu wystąpienia eksponencjalnie rosnącego czynnika $e^{+R \sin \varphi}$, całka po tym półokręgu nie znika, gdy $R \rightarrow \infty$. Ogólniej (lema Jordana!) kontury całek, w których występuje czynnik $e^{i|a|z}$ ($e^{-i|a|z}$) trzeba domknąć półokręgiem w górnej (dolnej) półpłaszczyźnie, gdyż tam część urojona zmiennej z jest dodatnia (ujemna), co w połączeniu z czynnikiem $+i|a|$ ($-i|a|$) daje tłumienie całki dla $R \rightarrow \infty$.

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\sin(ax)}{x(x^2 + b^2)}.$$

Rozwiązanie: Ponieważ funkcja podcałkowa jest parzysta, rozciągamy całkę na całą oś rzeczywistą i bierzemy połowę tego, co wyjdzie. Załóżmy ponadto, że $a > 0$ (wynik dla $a < 0$ jest po prostu minus wynikiem dla $a > 0$). Mianownik funkcji podcałkowej zeruje się w punkcie $x = 0$; nie jest to jednak istotna osobliwość, gdyż punkt ten jest zarazem zerem licznika. Kiedy jednak przechodzimy do całkowania po zamkniętym konturze funkcji

$$f(z) = \frac{e^{iaz}}{z(z^2 + b^2)},$$

(obliczana całka będzie dana przez część urojoną całki z powyższej funkcji po osi rzeczywistej) punkt $z = 0$ staje się punktem osobliwym i trzeba go przy całkowaniu wyizolować. Dlatego też w tym przypadku całkujemy funkcję $f(z)$ nie po konturze z rysunku 2, a po konturze pokazanym na rysunku 3 i bierzemy granicę $\varepsilon \rightarrow 0$. Z punktu widzenia całki po osi rzeczywistej z części rzeczywistej $f(z)$ procedura taka odpowiada dookreśleniu całki niewłaściwej z cosinusem w sensie wartości głównej (tj. symetrycznemu zbieganiu z lewej i prawej strony z x do zera).

Mamy zatem

$$\oint dz f(z) = \int_{-R}^{-\varepsilon} dx f(x) + \int_{\varepsilon}^R dx f(x) + \int_{\frac{1}{2}K_R} dz f(z) + \int_{\frac{1}{2}K_\varepsilon^-} dz f(z) = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i|b|}.$$

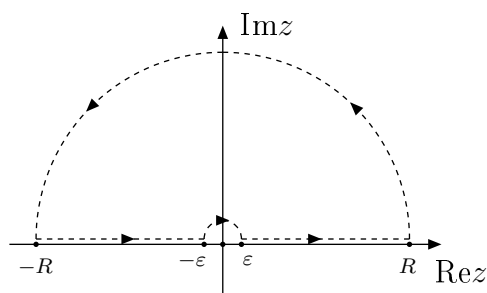
(Wskaźnik – przy K_ε przypomina, że całka po tym półokręgu jest brana w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara). Residuum funkcji $f(z)$ w jej biegunie prostym obliczamy standardowo:

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=i|b|} = \frac{e^{-a|b|}}{i|b|(2i|b|)} = -\frac{e^{-a|b|}}{2b^2}.$$

Zgodnie z lematem Jordana, całka po półokręgu o promieniu R znika w granicy $R \rightarrow \infty$ (bo założyliśmy, że $a > 0$). Z kolei w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ całka po małym półokręgu, na którym $z = \varepsilon e^{i\varphi}$, nie znika i daje⁴

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\frac{1}{2}K_\varepsilon^-} dz f(z) = \int_\pi^0 d\varphi i\varepsilon e^{i\varphi} \frac{e^{ia\varepsilon e^{i\varphi}}}{\varepsilon e^{i\varphi} (\varepsilon^2 e^{2i\varphi} + b^2)} = -i \frac{\pi}{b^2}.$$

⁴Wynik ten jest przejawem ogólnej regułki: jeśli funkcja ma w $z = z_0$ *biegun prosty* (tj. pierwszego rzędu) o residuum a_{-1} , to całka po opartym na kącie $\Delta\varphi$ fragmencie okręgu o promieniu ε i środku w z_0 daje, w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, wynik $\pm ia_{-1}|\Delta\varphi|$ (znak $+$ przy obiegu zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara i $-$ przy przeciwnym). Regułka ta *nie stosuje się* jeśli funkcja ma w z_0 biegun wyższego rzędu, lub punkt istotnie osobliwy (granica $\varepsilon \rightarrow 0$ naogół wtedy nie istnieje).



Rysunek 3: Kontur omijający biegun prosty w $z = 0$, zwany także “konturem ODS”, a po staropolsku OŹS (po dorysowaniu paru elementów kontur zaczyna przypominać pewną olbrzymią część słonia...).

Łącząc wyniki znajdujemy, że w podwójnej granicy $R \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{iax}}{x(x^2 + b^2)} = i \frac{\pi}{b^2} - 2\pi i \frac{e^{-a|b|}}{2b^2}.$$

Stąd, przyrównując do siebie części urojone i rzeczywiste obu stron powyższej równości, znajdujemy, że

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\sin(ax)}{x(x^2 + b^2)} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{\sin(ax)}{x(x^2 + b^2)} = \frac{\pi}{2b^2} (1 - e^{-a|b|}),$$

$$P \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{\cos(ax)}{x(x^2 + b^2)} = 0.$$

P oznacza tu całkę w sensie *wartości głównej* (na angielskim jiazykie *principal value* - stąd P) tj. otrzymywaną przy symetrycznym zbieganiu z dwu stron granic dwu części całki do punktu osobliwego funkcji podcałkowej.

Zadanie.

Obliczyć całkę

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\sin x}{x}.$$

Rozwiązanie: Całka ta jest warunkowo zbieżna. Jej wartość można znaleźć także metodami konwencjonalnymi, ale wymaga to większego nakładu pracy i sporej dozy sprytu.⁵ Korzystając twierdzenia o residuach można to zrobić następująco. Obliczamy całkę

$$-i \oint_{\Gamma} dz \frac{e^{iz}}{z}$$

⁵Patrz np. F. Leja *Rachunek różniczkowy i całkowy*, PWN, Warszawa 1973 (wyd. XII) s. 299.

po konturze Γ pokazanym na rysunku 3. Mamy wtedy

$$-i \oint_{\Gamma} dz f(z) \equiv \left(\int_{-R}^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^R \right) dx \frac{\sin x - i \cos x}{x} - i \int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^{-}} dz \frac{e^{iz}}{z} - i \int_{\frac{1}{2}K_R} dz \frac{e^{iz}}{z} = 0,$$

gdyż wewnątrz konturu funkcja jest holomorficzna.

Sprawdzamy najpierw, że całka po okręgu o promieniu R

$$\int_{\frac{1}{2}K_R} dz \frac{e^{iz}}{z} = \int_0^{\pi} d\varphi \frac{iR e^{i\varphi}}{R e^{i\varphi}} e^{iR(\cos \varphi + i \sin \varphi)}$$

znika w granicy $R \rightarrow \infty$. W rzeczy samej:

$$\begin{aligned} \left| \int_{\frac{1}{2}K_R} dz \frac{e^{iz}}{z} \right| &\leq \int_0^{\pi} d\varphi e^{-R \sin \varphi} = 2 \int_0^{\pi/2} d\varphi e^{-R \sin \varphi} \\ &\leq 2 \int_0^{\pi/2} d\varphi e^{-2R\varphi/\pi} = \frac{\pi}{R} (1 - e^{-R}) \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Wykorzystaliśmy tu tak jak poprzednio nierówność $\sin \varphi \geq 2\varphi/\pi$ słuszną dla $0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2}\pi$.

Następnie obliczamy całkę po małym półokręgu, na którym $z = \varepsilon e^{i\varphi}$:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^{-}} dz \frac{e^{iz}}{z} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} i \int_{\pi}^0 d\varphi e^{-\varepsilon \sin \varphi} e^{i\varepsilon \cos \varphi} \rightarrow i \int_{\pi}^0 d\varphi 1 = -i\pi.$$

W granicy $R \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$ mamy zatem równość

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\int_{-\infty}^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^{\infty} \right) dx \frac{\sin x - i \cos x}{x} = \pi.$$

Ponieważ $\cos x$ jest funkcją parzystą, całka z cosinusem daje zero (jest to całka z funkcji nieparzystej w symetrycznych granicach), co zgadza się z tym, że prawa strona jest liczbą czysto rzeczywistą (po lewej całka z cosinusem jest czysto urojona). Całka z sinusem daje zaś podwojoną szukaną całkę. Zatem

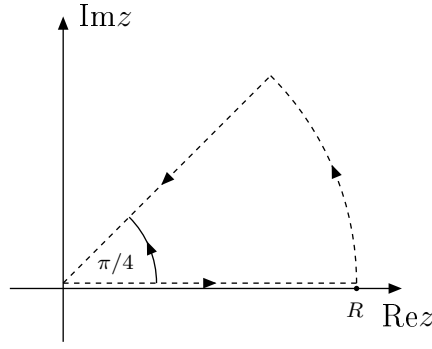
$$\int_0^{\infty} dx \frac{\sin x}{x} = \frac{\pi}{2}.$$

Zadanie

Obliczyć “frendzelki”, tj. całki Fresnela

$$F_S \equiv \int_0^{\infty} dx \sin(x^2), \quad F_C \equiv \int_0^{\infty} dx \cos(x^2).$$

Rozwiązanie: Całki te są zbieżne warunkowo: dzięki coraz szybszym, gdy $x \rightarrow \infty$, oscylacjom funkcji podcałkowych od -1 do $+1$, przyczynki wnoszone do całek przez duże



Rysunek 4: Kontur całkowania Γ_F .

x -y uśredniają się do zera. Aby je obliczyć całkujemy funkcję $f(z) = e^{-z^2}$ po konturze Γ_F pokazanym na rysunku 4. Ponieważ wewnątrz konturu funkcja $f(z)$ jest holomorficzna, mamy

$$\oint_{\Gamma_F} dz f(z) = \int_0^R dx e^{-x^2} + \int_{\frac{1}{8}K_R} dz f(z) + \int_{\text{skos}} dz f(z) = 0.$$

W granicy $R \rightarrow \infty$ całka po $\frac{1}{8}$ okręgu o promieniu R , na którym $z = R e^{i\varphi}$, znika:

$$\left| \int_{\frac{1}{8}K_R} dz f(z) \right| = \left| \int_0^{\pi/4} d\varphi i R e^{i\varphi} e^{-R^2 \cos 2\varphi} e^{-iR^2 \sin 2\varphi} \right| \leq R \int_0^{\pi/4} d\varphi e^{-R^2 \cos 2\varphi},$$

i korzystając z nierówności $\cos 2\varphi \geq 1 - 4\varphi/\pi$ (słusznej dla $0 \leq \varphi \leq \pi/4$) mamy

$$\left| \int_{\frac{1}{8}K_R} dz f(z) \right| \leq R e^{-R^2} \int_0^{\pi/4} d\varphi e^{4R^2\varphi/\pi} = \frac{\pi}{4R} (1 - e^{-R^2}) \rightarrow 0.$$

Dalej,⁶

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^R dx e^{-x^2} = \int_0^\infty dx e^{-x^2} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^\infty dx e^{-x^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\pi},$$

i uwzględniając, że w całce po skosie, $z = r e^{\frac{i}{4}\pi}$, $dz = dr e^{\frac{i}{4}\pi}$ oraz $z^2 = r^2 e^{\frac{i}{2}\pi} = -ir^2$, mamy

$$\frac{1}{2} \sqrt{\pi} + e^{\frac{i}{4}\pi} \int_\infty^0 dr e^{-ir^2} = 0.$$

⁶Ponieważ bywają i tacy, co nie wiedzą:

$$\left(\int_{-\infty}^\infty dx e^{-x^2} \right)^2 = \int_{-\infty}^\infty dx e^{-x^2} \int_{-\infty}^\infty dy e^{-y^2} = \iint_{\mathbb{R}^2} dx dy e^{-(x^2+y^2)} = 2\pi \int_0^\infty dr r e^{-r^2} = \pi.$$

Stąd,

$$\frac{1+i}{\sqrt{2}} \int_0^\infty dr \cos(r^2) - i \frac{1+i}{\sqrt{2}} \int_0^\infty dr \sin(r^2) = \frac{1}{2} \sqrt{\pi},$$

i przyrównując do siebie części rzeczywiste i urojone po lewej i prawej stronie otrzymujemy dwa równania

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^\infty dr \cos(r^2) + \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^\infty dr \sin(r^2) &= \frac{1}{2} \sqrt{\pi}, \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^\infty dr \cos(r^2) - \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^\infty dr \sin(r^2) &= 0, \end{aligned}$$

których rozwiązanie daje

$$F_S = F_C = \sqrt{\frac{\pi}{8}}.$$

Zadanie

Podać warunki zbieżności całki

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{ax}}{1+e^x}$$

i obliczyć ją metodą residuów.

Rozwiązanie: Dla $x \rightarrow +\infty$ funkcja podcałkowa zachowuje się jak $e^{(a-1)x}$, a dla $x \rightarrow -\infty$, jak e^{ax} . Wynika stąd, że całka jest zbieżna (bezwzględnie), jeśli $0 < a < 1$.

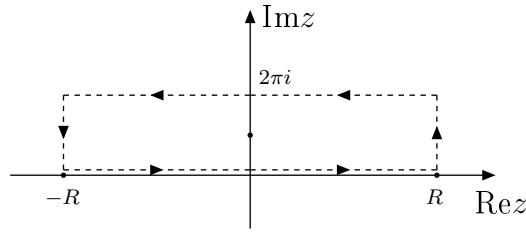
Aby znaleźć całkę dla takich wartości a , obliczamy całkę po konturze Γ pokazanym na rysunku 5 z funkcji $f(z) = e^{az}/(1+e^z)$. Funkcja ta ma bieguny proste w punktach, w których $e^z = -1$, tj. w $z_n = i(\pi + 2n\pi)$, $n \in \mathbb{Z}$. Wewnątrz konturu znajduje się jednak tylko punkt $z_0 = i\pi$. Kontur składa się z czterech odcinków prostych, na których odpowiednio: $z = x$, $z = R + iy$, $z = x + 2\pi i$ i wreszcie $z = -R + iy$. Mamy zatem

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} dz f(z) &= \int_{-R}^R dx \frac{e^{ax}}{1+e^x} + i \int_0^{2\pi} dy \frac{e^{aR} e^{ia y}}{1+e^R e^{iy}} \\ &+ \int_R^{-R} dx \frac{e^{2a\pi i} e^{ax}}{1+e^x} + i \int_{2\pi}^0 dy \frac{e^{-aR} e^{ia y}}{1+e^{-R} e^{iy}} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i\pi}. \end{aligned}$$

Kontur został tak sprytnie dobrany, że w mianownik w trzeciej całce jest taki sam jak w pierwszej i po wyłączeniu przed nią stałego czynnika $e^{2a\pi i}$ jest ona równa (z minusem, ze względu na przeciwną orientację) pierwszej całce.

Jak zwykle musimy pokazać, że w granicy $R \rightarrow \infty$ całki po bokach prostokąta znikają. Szacujemy. Prawy boczek (kroki standardowe):

$$\left| \int_0^{2\pi} dy \frac{e^{aR} e^{ia y}}{1+e^R e^{iy}} \right| \leq \int_0^{2\pi} dy \frac{e^{aR}}{|1+e^R e^{iy}|} \leq \int_0^{2\pi} dy \frac{e^{aR}}{e^R - 1} \rightarrow 0,$$



Rysunek 5: Prostokątny kontur całkowania w płaszczyźnie zmiennej zespolonej z .

jako że założyliśmy, że $a < 1$. Lewy podobnie:

$$\left| \int_{2\pi}^0 dy \frac{e^{-aR} e^{ia y}}{1 + e^{-R} e^{iy}} \right| \leq \int_0^{2\pi} dy \frac{e^{-aR}}{1 - e^{-R}} \rightarrow 0,$$

bo z kolei $0 < a$. Czyli w granicy $R \rightarrow \infty$ mamy:

$$(1 - e^{2a\pi i}) \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{ax}}{1 + e^x} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i\pi}.$$

Obliczamy residuum (H nad znakiem równości oznacza zastosowanie reguły Szpitalnika):

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i\pi} &= \lim_{z \rightarrow i\pi} \frac{(z - i\pi)e^{az}}{1 + e^z} \\ &= e^{ia\pi} \lim_{z \rightarrow i\pi} \frac{z - i\pi}{1 + e^z} \stackrel{\text{H}}{=} e^{ia\pi} \left. \frac{1}{e^z} \right|_{z=i\pi} = -e^{ia\pi}. \end{aligned}$$

Ostatecznie więc⁷

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{ax}}{1 + e^x} = \frac{-2\pi i e^{ia\pi}}{1 - e^{2a\pi i}} = \frac{-2\pi i}{e^{-ia\pi} - e^{a\pi i}} = \frac{\pi}{\sin(a\pi)}.$$

Zadanie

Metodą residuów obliczyć całkę “kolokwialkę” tzn. typową wydumaną (z powodu tego π^2) całkę, która nadaje się na kolokwia

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + \pi^2) \operatorname{ch} x}.$$

Rozwiązanie: Całkę tę można obliczyć całkując funkcję

$$f(z) = \frac{1}{(z - i\pi) \operatorname{ch} z},$$

⁷Czy ten sam wynik dostaniemy biorąc górny bok konturu na rysunku 5 na wysokości $4\pi i$? A na wysokości $2\pi i$ k z $k \in \mathbb{Z}_+$ lub $k \in \mathbb{Z}_-$? (Ćwiczenie w sumowaniu szeregu geometrycznego...)

po konturze z rysunku 5. Mamy bowiem

$$\oint dz f(z) = \int_{-R}^R \frac{dx}{(x - i\pi) \operatorname{ch} x} + \int_R^{-R} \frac{dx}{(x + 2\pi i - i\pi) \operatorname{ch}(x + 2\pi i)} + \int_{\text{boki}} dz f(z) = 2\pi i \sum_i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_i},$$

gdzie z_i są punktami osobliwymi funkcji $f(z)$ znajdującymi się wewnątrz konturu całkowania. W granicy $R \rightarrow \infty$ całki po bokach konturu z rysunku 5 znikają. Np. całkę po prawym boku, na którym $z = R + iy$, szacujemy następująco:

$$\left| \int_0^{2\pi} \frac{i dy}{(R + iy - i\pi) \operatorname{ch}(R + iy)} \right| \leq \int_0^{2\pi} \frac{2dy}{|R + i(y - \pi)| |e^R e^{iy} + e^{-R} e^{-iy}|} \leq \int_0^{2\pi} \frac{2dy}{|R + i(y - \pi)| (e^R - e^{-R})} \rightarrow 0.$$

Ponieważ jednak $\operatorname{ch}(x + 2\pi i) = \operatorname{ch} x$, po odwróceniu granic drugiej całki otrzymujemy w granicy $R \rightarrow \infty$ związek

$$2\pi i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + \pi^2) \operatorname{ch} x} = 2\pi i \sum_i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_i},$$

Funkcja $f(z)$ ma biegun prosty w $z = i\pi$,

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=i\pi} = \frac{1}{\operatorname{ch}(i\pi)} = \frac{1}{\cos \pi} = -1,$$

oraz bieguny proste w $z_n = i\pi(\frac{1}{2} + n\pi)$, $n \in \mathbb{Z}$, z czego tylko te odpowiadające $n = 0$ i $n = 1$ znajdują się wewnątrz konturu całkowania.

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i\frac{\pi}{2}} &= \lim_{z \rightarrow i\frac{\pi}{2}} \frac{z - i\frac{\pi}{2}}{(z - i\pi) \operatorname{ch} z} \stackrel{H}{=} \frac{1}{-i\frac{\pi}{2} \operatorname{sh}(i\frac{\pi}{2})} = \frac{2}{\pi}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=i\frac{3\pi}{2}} &= \lim_{z \rightarrow i\frac{3\pi}{2}} \frac{z - i\frac{3\pi}{2}}{(z - i\pi) \operatorname{ch} z} \stackrel{H}{=} \frac{1}{i\frac{\pi}{2} \operatorname{sh}(i\frac{3\pi}{2})} = \frac{2}{\pi}. \end{aligned}$$

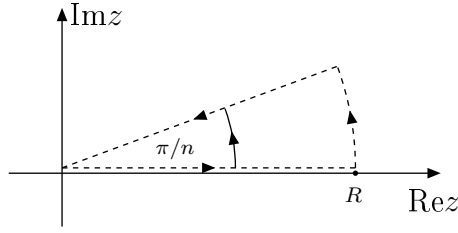
Łącząc wszystko znajdujemy, że

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + \pi^2) \operatorname{ch} x} = \frac{4}{\pi} - 1.$$

Zadanie

Metodą residuów obliczyć całkę

$$\int_0^{\infty} dx \frac{x^n}{1 + x^{2n}}.$$



Rysunek 6: Kontur całkowania typu “klin”.

Rozwiązanie: Potrzebna tu sztuczka jest podobna do tej z poprzedniego zadania z tym, że kontur trzeba teraz wybrać tak, by jednym jego fragmentem była dodatnia półoś rzeczywista i by na drugim fragmencie czynnik z^{2n} w mianowniku był też równy x^{2n} . Takie wymagania spełnia pokazany na rysunku 6 kontur typu “klin”. Po tym konturze całkujemy funkcję $f(z) = z^n/(1 + z^{2n})$. Ma ona bieguny proste w miejscach zerowych mianownika, tj. w punktach będących pierwiastkami $2n$ -tego stopnia z -1 :

$$z_k = (-1)^{1/2n} = \exp\left(\frac{i}{2n}(\pi + 2k\pi)\right), \quad k = 0, 1, \dots, 2n - 1.$$

Jak nietrudno zauważyć, wewnątrz konturu pokazanego na rysunku 6 znajduje się tylko pierwiastek z_0 .

Mamy zatem:

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} dz f(z) &= \int_0^R dx f(x) + \int_0^{\pi/n} d\varphi iR e^{i\varphi} f(R e^{i\varphi}) \\ &\quad + \int_R^0 dr e^{i\pi/n} \frac{r^n e^{i\pi}}{1 + r^{2n}} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_0}. \end{aligned}$$

W ostatniej całce po górnej “krawędzi klina” podstawiliśmy $z = r e^{i\pi/n}$ i wykorzystaliśmy to, że wtedy $z^{2n} = r^{2n}$.

Następne kroki polegają na standardowym sprawdzeniu, że (jeśli $n > 1$)

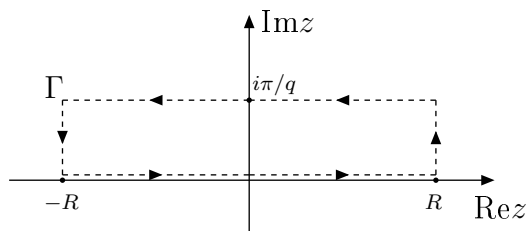
$$\left| \int_0^{\pi/n} d\varphi iR e^{i\varphi} f(R e^{i\varphi}) \right| \leq \int_0^{\pi/n} d\varphi \frac{R^{n+1}}{R^{2n} - 1} \rightarrow 0,$$

gdy $R \rightarrow \infty$ oraz na zauważeniu, że

$$\int_R^0 dr e^{i\pi/n} \frac{r^n e^{i\pi}}{1 + r^{2n}} = -e^{i\pi/n} \int_R^0 dr \frac{r^n}{1 + r^{2n}} = e^{i\pi/n} \int_0^R dx \frac{x^n}{1 + x^{2n}},$$

co w granicy $R \rightarrow \infty$ pozwala napisać

$$(1 + e^{i\pi/n}) \int_0^\infty dx \frac{x^n}{1 + x^{2n}} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_0}.$$



Rysunek 7: Prostokątny kontur całkowania w płaszczyźnie zmiennej zespolonej z .

Residuum nietrudno obliczyć (biegun prosty):

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=z_0} = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{(z - z_0)z^n}{z^{2n} + 1} = i \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{z - z_0}{z^{2n} + 1} =_{\text{H}} \left| \frac{i}{2n z^{2n-1}} \right|_{z=z_0} = \frac{-i}{2n} e^{i\pi/2n}.$$

Tak więc

$$\int_0^\infty dx \frac{x^n}{1 + x^{2n}} = 2\pi i \frac{-i e^{i\pi/2n}}{2n(1 + e^{i\pi/n})} = \frac{\pi}{2n} \frac{1}{\cos(\pi/2n)}.$$

Zadanie

Podać warunki zbieżności całki

$$I = \int_0^\infty dx \frac{\operatorname{ch}(px)}{\operatorname{ch}(qx)} \cos(mx),$$

i obliczyć ją metodą wykorzystującą residua.

Rozwiązanie: Całka jest zbieżna, jeśli $q > p$. Aby ją obliczyć rozpatrujemy całkę

$$\oint_\Gamma dz f(z) \equiv \oint_\Gamma dz \frac{e^{pz+imz}}{\operatorname{ch}(qz)},$$

po zamkniętym konturze Γ pokazanym na rysunku 7.

W granicy $R \rightarrow \infty$ część rzeczywista całki po osi rzeczywistej z funkcji $f(z)$ da podwojoną szukaną całkę:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^\infty dx \frac{e^{px+imx}}{\operatorname{ch}(qx)} &= \int_{-\infty}^0 dx \frac{e^{px+imx}}{\operatorname{ch}(qx)} + \int_0^\infty dx \frac{e^{px+imx}}{\operatorname{ch}(qx)} \\ &= \int_0^\infty dx \frac{e^{-px-imx}}{\operatorname{ch}(qx)} + \int_0^\infty dx \frac{e^{px+imx}}{\operatorname{ch}(qx)} \\ &= 2 \int_0^\infty dx \frac{\operatorname{ch}(px)}{\operatorname{ch}(qx)} \cos(mx) + 2i \int_0^\infty dx \frac{\operatorname{sh}(px)}{\operatorname{ch}(qx)} \sin(mx). \end{aligned}$$

Wewnątrz konturu pokazanego na rysunku 7 funkcja $f(z)$ ma tylko jeden biegun prosty w $z = i\pi/2q$. Jej residuum w tym punkcie wynosi

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\frac{i\pi}{2q}} = e^{(p+im)\frac{i\pi}{2q}} \lim_{z \rightarrow \frac{i\pi}{2q}} \frac{z - i\pi/2q}{\operatorname{ch}(qz)}$$

$$=^H e^{(p+im)\frac{i\pi}{2q}} \lim_{z \rightarrow \frac{i\pi}{2q}} \frac{1}{q \operatorname{sh}(i\pi/2)} = \frac{e^{(p+im)\frac{i\pi}{2q}}}{qi}.$$

(H nad znakiem równości oznacza zastosowanie reguły Szpitalnika).

Całka po górnym boku konturu z rysunku 7, na którym $z = x + i\pi$, jest równa

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{(p+im)(x+i\pi/q)}}{\operatorname{ch}(qx + i\pi)} = e^{(p+im)\frac{i\pi}{q}} \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{(p+im)x}}{\operatorname{ch}(qx)},$$

gdyż $\operatorname{ch}(qx + i\pi) = -\operatorname{ch}(qx)$. Jeśli więc tylko znikają całki po pionowych bokach konturu z rysunku 7, otrzymujemy z twierdzenia o residuach związek:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{e^{(p+im)x}}{\operatorname{ch}(qx)} &= \frac{2\pi}{q} \frac{e^{(p+im)\frac{i\pi}{2q}}}{1 + e^{(p+im)\frac{i\pi}{q}}} = \frac{\pi}{q} \frac{1}{\cos\left[(p+im)\frac{\pi}{2q}\right]} \\ &= \frac{\pi}{q} \frac{\cos\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{m\pi}{2q}\right) + i \sin\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{m\pi}{2q}\right)}{\cos^2\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{m\pi}{2q}\right) + \sin^2\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{sh}^2\left(\frac{m\pi}{2q}\right)}. \end{aligned}$$

Zatem

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\operatorname{ch}(px)}{\operatorname{ch}(qx)} \cos(mx) = \frac{\pi}{2q} \frac{\cos\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{m\pi}{2q}\right)}{\cos^2\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{m\pi}{2q}\right) + \sin^2\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{sh}^2\left(\frac{m\pi}{2q}\right)},$$

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\operatorname{sh}(px)}{\operatorname{ch}(qx)} \sin(mx) = \frac{\pi}{2q} \frac{\sin\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{m\pi}{2q}\right)}{\cos^2\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{m\pi}{2q}\right) + \sin^2\left(\frac{p\pi}{2q}\right) \operatorname{sh}^2\left(\frac{m\pi}{2q}\right)}.$$

Pozostaje tylko pokazać, że znikają całki po bokach prostokąta z rysunku 7. Na tych bokach $z = \pm R + iy$ i

$$\left| \int_{\text{bok}} dz f(z) \right| \leq 2 \int_0^{\pi/q} dy \frac{e^{\pm pR} e^{-my}}{|e^{\pm qR} e^{iqy} + e^{\mp qR} e^{-iqy}|}.$$

Widać więc, że np. dla prawego boku, tj. dla $z = R + iy$, gdy $R \rightarrow \infty$,

$$\left| \int_{\text{prawy bok}} dz f(z) \right| \leq 2 \int_0^{\pi/q} dy \frac{e^{pR} e^{-my}}{e^{qR} - e^{-qR}} \rightarrow 0,$$

jeśli, co też i było warunkiem zbieżności wyjściowej całki, $q > p$.

Przypomnienie

Funkcja $\ln(z)$ nie może być określona na całej płaszczyźnie zespolonej zmiennej z . Dla wszystkich $k \in \mathbb{Z}$ wyrażenie

$$r e^{i(\varphi+2\pi k)}$$

reprezentuje jedną i tę samą liczbę zespoloną z , ale wartość logarytmu z ,

$$\ln(z) = \ln(r e^{i(\varphi+2\pi k)}) = \ln r + 2k\pi i,$$

zależy od wyboru $k \in \mathbb{Z}$. Przy obchodzeniu punktu $z = 0$, gdy faza argumentu funkcji $\ln z$ przyrastałaby o 2π , wartość funkcji logarytm zmieniałaby się o $2\pi i$ za każdym obiegiem. Z tego powodu punkt $z = 0$ jest zwany *punktem rozgałęzienia* funkcji $\ln z$.

Najbardziej eleganckim wyjściem jest określenie logarytmu jako funkcji jednoznacznej (to jest pleonazm: funkcja z definicji jest jednoznaczna) jest określenie go na powierzchni Riemanna reprezentowanej przez nawijające się wokół punktu $z = 0$ powierzchnie (przypominające kluczowy element - być może dziś już przedpotopowych - maszynek do mięsa). Z praktycznego punktu widzenia (tj. do obliczania całek z funkcji rzeczywistych metodą residuów) wystarczy jednak określić logarytm na płaszczyźnie zespolonej z rozcięciem biegnącym od punktu rozgałęzienia $z = 0$ do nieskończoności, co umożliwia jednoznaczne przypisanie fazy każdej (nieleżącej na rozcięciu) liczbie zespolonej, jako że na rozciętej płaszczyźnie do tego samego z nie można powrócić po drodze owijającej się (raz lub więcej razy) wokół punktu $z = 0$.

Najwygodniej jest przyjąć rozcięcie biegnące od punktu $z = 0$ do nieskończoności wzdłuż dodatniej półosi rzeczywistej i zdefiniować fazę z tak, by logarytm dodatniej liczby rzeczywistej był taki sam jak logarytm określony na $\mathbb{R}_+$. Przyjmujemy zatem, że liczba $z = x + i\delta$, gdzie $x > 0$, a $\delta \rightarrow 0^+$ (którą będziemy oznaczać $x + i0$) ma fazę $\varphi = 0$ (i wobec tego $\ln(x + i0) = \ln x$), a liczba $z = x - i0$ (tj. $z = x - i\delta$) ma fazę 2π (i stąd $\ln(x - i0) = 2\pi + \ln x$). Zauważmy też, że logarytm z rzeczywistej liczby ujemnej $x = -|x|$ jest przy takiej definicji logarytmu dobrze określoną liczbą zespoloną $\ln |x| + i\pi$.

Zadanie

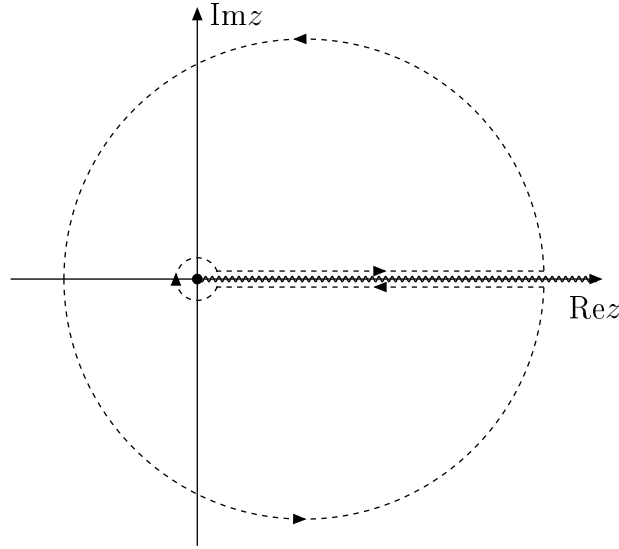
Obliczyć całkę

$$\oint_{\Gamma} dz f(z) \equiv \oint_{\Gamma} dz \frac{\ln z}{z^2 + a^2}$$

po konturze “dziurka od klucza” pokazanym na rysunku 8.

Rozwiązanie: Wewnątrz konturu funkcja podcałkowa ma dwa bieguny proste w punktach $z_{\pm} = \pm i|a|$. Zatem

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} dz f(z) &\equiv \int_{K_{\varepsilon}^{-}} dz f(z) + \int_{\varepsilon}^R dx f(x + i0) \\ &+ \int_{K_R} dz f(z) + \int_R^{\varepsilon} dx f(x - i0) = 2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} + \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} \right). \end{aligned}$$



Rysunek 8: Kontur Γ zwany “dziurką od klucza”. Falista linia biegnąca wzdłuż dodatniej półosi rzeczywistej oznacza rozcięcie, tj. zbiór liczb nie należących do dziedziny funkcji $\ln z$. Promień ε małego okręgu obiegającego $z = 0$ dąży do zera; promień R dużego okręgu dąży do nieskończoności.

Nietrudno pokazać, że całka po małym okręgu, na którym $z = \varepsilon e^{i\varphi}$, znika w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$. Rzeczywiście:

$$\begin{aligned} \left| \int_{K_\varepsilon^-} dz f(z) \right| &\leq \int_\delta^{2\pi-\delta} d\varphi \left| \varepsilon \frac{\ln(\varepsilon e^{i\varphi})}{a^2 + \varepsilon^2 e^{2i\varphi}} \right| \\ &\leq \int_0^{2\pi} d\varphi \left| \frac{\varepsilon \ln \varepsilon}{a^2 + \varepsilon^2 e^{2i\varphi}} \right| + \int_0^{2\pi} d\varphi \left| \varepsilon \frac{\varphi}{a^2 + \varepsilon^2 e^{2i\varphi}} \right| \rightarrow 0, \end{aligned}$$

gdyż w granicy tej mianownik w obu wyrazach dąży do stałej równej a^2 , a same całki są skończone i proporcjonalne do znikających czynników $\varepsilon \ln \varepsilon$ oraz ε .

Również całka po dużym okręgu, na którym $z = R e^{i\varphi}$ znika w granicy $R \rightarrow \infty$:

$$\left| \int_{K_R} dz f(z) \right| \leq \int_0^{2\pi} d\varphi R \left| \frac{\ln R + i\varphi}{R^2 e^{2i\varphi} + a^2} \right| \leq \int_0^{2\pi} d\varphi R \frac{|\ln R + i\varphi|}{R^2 - a^2} \rightarrow 0.$$

W podwójnej granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ mamy zatem równość

$$\int_0^\infty dx f(x + i0) + \int_\infty^0 dx f(x - i0) = 2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} + \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} \right).$$

Residua łatwo znaleźć:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= \frac{\ln(|a|e^{i\pi/2})}{2i|a|}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} &= \frac{\ln(|a|e^{3i\pi/2})}{-2i|a|}, \end{aligned}$$

tak iż suma residuów wynosi $-\pi/2|a|$. Ponieważ

$$f(x - i0) = \frac{\ln(x e^{2\pi i})}{x^2 + a^2} = \frac{\ln x}{x^2 + a^2} + 2\pi i \frac{1}{x^2 + a^2},$$

wyrazy z logarytmami redukują się (po “wyprostowaniu” granic drugiej całki) i uzyskujemy równość

$$-2\pi i \int_0^\infty \frac{dx}{x^2 + a^2} = 2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} + \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} \right) = 2\pi i \left(-\frac{\pi}{2|a|} \right),$$

która jakkolwiek prawdziwa, sama w sobie jest mało interesująca - ten sam wynik, tj. całkę z $f(x) = 1/(x^2 + a^2)$ można znaleźć prościej. Przykład ten pokazuje jednak, jak należy się obchodzić z logarytmami. Co więcej, łatwo na tym przykładzie sprawdzić, że uzyskiwane wyniki nie zależą od wyboru gałęzi logarytmu, tj. otrzymalibyśmy ten sam końcowy związek, nawet gdyby zdefiniować logarytm tak, że na górnym brzegu rozcięcia mielibyśmy $\ln z = \ln(x e^{2\pi ki})$, a na dolnym wobec tego $\ln z = \ln(x e^{2\pi(k+1)i})$.

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2},$$

wykorzystując kontur typu “dziurka od klucza” z rysunku 8.

Rozwiązanie: Poprzedni przykład pokazuje, że całkowanie funkcji $(z^2 + a^2)^{-1} \ln z$ po konturze “dziurka od klucza” nie daje poszukiwanej całki (jak zobaczymy dalej, całkę tę można jednak otrzymać całkując funkcję $(z^2 + a^2)^{-1} \ln z$ po konturze ODS pokazanym na rysunku 3). Spróbujmy więc scałkować po “dziurce od klucza” funkcję

$$f(z) = \frac{(\ln z)^2}{z^2 + a^2}.$$

W granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ (znikanie w tej granicy całek po okręgach małym i dużym wykazuje się tak samo, jak poprzednio) otrzymujemy:

$$\int_0^\infty dx \frac{(\ln x)^2}{x^2 + a^2} + \int_\infty^0 dx \frac{(2\pi i + \ln x)^2}{x^2 + a^2} = 2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{z=+i|a|} + \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} \right).$$

Obliczamy residua:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=+i|a|} &= \frac{\ln^2(|a|e^{i\frac{\pi}{2}})}{2i|a|}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} &= \frac{\ln^2(|a|e^{i\frac{3\pi}{2}})}{-2i|a|}. \end{aligned}$$

Ich suma wynosi

$$\begin{aligned}\sum \operatorname{res} f(z) &= \frac{1}{2i|a|} \left\{ \ln^2 |a| + i\pi \ln |a| - \frac{\pi^2}{4} - \left(\ln^2 |a| + 3i\pi \ln |a| - \frac{9\pi^2}{4} \right) \right\} \\ &= \frac{1}{i|a|} (-i\pi \ln |a| + \pi^2) .\end{aligned}$$

Rozpisując kwadrat logarytmu w drugiej całce i obracając w niej granice całkowania znajdujemy, że całki z $\ln^2 x$ ulegają redukcji i otrzymujemy równość:

$$-4\pi i \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} + 4\pi^2 \int_0^\infty \frac{dx}{x^2 + a^2} = 2\pi i \frac{\pi^2 - i\pi \ln |a|}{i|a|} ,$$

z której, przyrównując do siebie części rzeczywiste i urojone obu stron, otrzymujemy dwie całki (drugą z nich już oczywiście znamy):

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} = \frac{\pi}{2|a|} \ln |a| , \quad \int_0^\infty \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{\pi}{2|a|} .$$

Zadanie

Obliczyć

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} ,$$

wykorzystując kontur ODS z rysunku 3.

Rozwiązanie: Całkujemy po konturze ODS funkcję $(z^2 + a^2)^{-1} \ln z$. Standardowo pokazujemy, że całki po małym półokręgu o promieniu ε oraz po dużym półokręgu o promieniu R znikają w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$. W tej granicy mamy zatem

$$\oint_{\text{ODS}} dz f(z) = \int_{-\infty}^0 dx \frac{\ln(|x| e^{i\pi})}{x^2 + a^2} + \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} ,$$

czyli

$$i\pi \int_{-\infty}^0 \frac{dx}{x^2 + a^2} + \int_{-\infty}^0 dx \frac{\ln |x|}{x^2 + a^2} + \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} = 2\pi i \frac{\frac{i}{2}\pi + \ln |a|}{2i|a|} .$$

Uwzględniliśmy tu to, że wewnątrz konturu ODS znajduje się tylko biegun prosty w $z = i|a|$. Dokonując w dwu pierwszych całkach zamiany zmiennych $x \rightarrow -x$ i przyrównując następnie do siebie części rzeczywiste i urojone obu stron równości dostajemy stąd dwa (znane już) wyniki:

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} = \frac{\pi}{2|a|} \ln |a| , \quad \int_0^\infty \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{\pi}{2|a|} .$$

Zadanie

Do kompletu obliczmy jeszcze całkę z funkcji

$$f(z) = \frac{\ln^2 z}{z^2 + a^2},$$

po konturze ODS z rysunku 3.

Rozwiązanie: Jak zwykle całki po małym półokręgu o promieniu ε oraz po dużym okręgu o promieniu R znikają w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$. W tej granicy otrzymujemy więc

$$\oint_{\text{ODS}} dz f(z) = \int_{-\infty}^0 dx \frac{(i\pi + \ln|x|)^2}{x^2 + a^2} + \int_0^{\infty} dx \frac{\ln^2 x}{x^2 + a^2} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|}.$$

Residuum tej funkcji w $z = i|a|$ było już znalezione. Rozpisując pierwszą całkę otrzymujemy więc

$$\begin{aligned} -\pi^2 \int_{-\infty}^0 \frac{dx}{x^2 + a^2} + 2\pi i \int_{-\infty}^0 dx \frac{\ln|x|}{x^2 + a^2} + \int_{-\infty}^0 dx \frac{\ln^2|x|}{x^2 + a^2} \\ + \int_0^{\infty} dx \frac{\ln^2 x}{x^2 + a^2} = \frac{\pi}{|a|} \left(\ln^2|a| + i\pi \ln|a| - \frac{\pi^2}{4} \right). \end{aligned}$$

Po dokonaniu zamiany zmiennych $x \rightarrow -x$ w trzech pierwszych całkach, przyrównanie części urojonych obu stron daje znaną już całkę

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} = \frac{\pi}{2|a|} \ln|a|.$$

Części rzeczywiste dają zaś

$$2 \int_0^{\infty} dx \frac{\ln^2 x}{x^2 + a^2} = \pi^2 \int_0^{\infty} \frac{dx}{x^2 + a^2} + \frac{\pi}{|a|} \left(\ln^2|a| - \frac{\pi^2}{4} \right).$$

Ponieważ znamy już całkę stojącą po prawej stronie ($\pi/2|a|$), otrzymujemy nowy wynik (potwierdzany przez program *Mathematica*)

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\ln^2 x}{x^2 + a^2} = \frac{\pi}{8|a|} (\pi^2 + 4 \ln^2|a|).$$

Aby nie powstało mylne wrażenie, że zawsze jest lepiej całkować funkcje postaci funkcja wymierna razy logarytm po konturze ODS z rysunku 3, spróbujmy rozwiązać następujące zadanie.

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^{\infty} dx \frac{x \ln x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)},$$

metodą residuów.

Rozwiązanie: Zobaczmy co wyjdzie, jeśli scałkujemy funkcję $f(z) = z(z^2 + a^2)^{-1}(z^2 + b^2)^{-1} \ln z$ po konturze ODS (rysunek 3). Można jak zwykle pokazać, że całki po półokręgach małym i dużym znikają w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ i z twierdzenia o residuach otrzymujemy równość

$$\int_{-\infty}^0 dx \frac{x \ln(x e^{i\pi})}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} + \int_0^{\infty} dx \frac{x \ln x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = 2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{i|a|} + \operatorname{res} f(z)|_{i|b|} \right).$$

Ponieważ jednak mnożąca logarytm funkcja była *nieparzysta* (w poprzednich przykładach funkcje takie były parzyste), po dokonaniu w pierwszej całce podstawienia $x \rightarrow -x$ i obróceniu granic całkowania, całki z logarytmami ulegną redukcji i otrzymamy równość

$$-i\pi \int_0^{\infty} dx \frac{x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = 2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} + \operatorname{res} f(z)|_{z=i|b|} \right).$$

Po obliczeniu residuów

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= \frac{i|a| \ln(|a|e^{i\frac{\pi}{2}})}{2i|a|(b^2 - a^2)} = \frac{\ln(|a|e^{i\frac{\pi}{2}})}{2(b^2 - a^2)}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=i|b|} &= \frac{i|b| \ln(|b|e^{i\frac{\pi}{2}})}{2i|b|(a^2 - b^2)} = \frac{\ln(|b|e^{i\frac{\pi}{2}})}{2(a^2 - b^2)}, \end{aligned}$$

znajdujemy, że

$$-i\pi \int_0^{\infty} dx \frac{x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = 2\pi i \frac{\ln(|a|/|b|)}{2(b^2 - a^2)},$$

czyli

$$\int_0^{\infty} dx \frac{x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = \frac{1}{a^2 - b^2} \ln \frac{|a|}{|b|}.$$

Nie jest to jednak ta całka, którą chcieliśmy obliczyć!

W tej sytuacji niema innego wyjścia niż skorzystanie z konturu “dziurka od klucza” (rysunek 8) i całkowanie po nim funkcji

$$g(z) = \frac{z \ln^2 z}{(z^2 + a^2)(z^2 + b^2)}.$$

Po standardowym pokazaniu, że całki po obu okręgach znikają w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ otrzymujemy równość

$$\int_0^{\infty} dx \frac{x \ln^2 x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} + \int_{\infty}^0 dx \frac{x (2\pi i + \ln x)^2}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = 2\pi i \sum_{z_0 = \pm i|a|, \pm i|b|} \operatorname{res} g(z)|_{z=z_0}.$$

Po uporządkowaniu całki z kwadratami logarytmów zredukują się, ale zostanie pożądana całka z logarytmem. Po obliczeniu residuów

$$\begin{aligned}\operatorname{res} g(z)|_{z=i|a|} &= \frac{(i\pi/2 + \ln |a|)^2}{2(b^2 - a^2)}, \\ \operatorname{res} g(z)|_{z=-i|a|} &= \frac{(3i\pi/2 + \ln |a|)^2}{2(b^2 - a^2)}, \\ \operatorname{res} g(z)|_{z=i|b|} &= \frac{(i\pi/2 + \ln |b|)^2}{2(a^2 - b^2)}, \\ \operatorname{res} g(z)|_{z=-i|b|} &= \frac{(3i\pi/2 + \ln |b|)^2}{2(a^2 - b^2)},\end{aligned}$$

otrzymujemy

$$\begin{aligned}-4\pi i \int_0^\infty dx \frac{x \ln x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} + 4\pi^2 \int_0^\infty dx \frac{x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} \\ = \frac{2\pi i}{2(a^2 - b^2)} \left[-4\pi i \ln \frac{|a|}{|b|} - 2(\ln^2 |a| - \ln^2 |b|) \right].\end{aligned}$$

Mamy stąd tę samą całkę, co poprzednio:

$$\int_0^\infty dx \frac{x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = \frac{1}{a^2 - b^2} \ln \frac{|a|}{|b|},$$

oraz całkę, którą chcieliśmy obliczyć (oba wyniki potwierdza program *Mathematica*):

$$\int_0^\infty dx \frac{x \ln x}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = \frac{1}{2(a^2 - b^2)} (\ln^2 |a| - \ln^2 |b|).$$

Uwaga

Z zadań tych płynie następująca nauka: jeśli pragniemy metodą residuów obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx f(x) = \int_0^\infty dx R(x) \ln^n x,$$

w której $R(x)$ jest funkcją wymierną (zakładamy, że taką, iż powyższa całka jest zbieżna, przy czym wystarczy zbieżność warunkowa), to w ogólnym przypadku musimy ją obliczać całkując po konturze “dziurka od klucza” (rysunek 8) funkcję $R(z) \ln^{n+1} z$. Z konturu ODS z rysunku 3 możemy skorzystać (całkując po nim funkcję $R(z) \ln^n z$) tylko wtedy, gdy funkcja $R(x)$ jest parzysta.

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{(x^2 + a^2)^2}.$$

Rozwiązanie: Ponieważ funkcja wymierna mnożąca logarytm jest parzysta, najlepiej wykorzystać w tym celu kontur ODS (rysunek 3). Po standardowym sprawdzeniu, że całki po obu półokręgach znikają w podwójnej granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$, mamy równość

$$\int_{-\infty}^0 dx \frac{\ln(|x| e^{i\pi})}{(x^2 + a^2)^2} + \int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{(x^2 + a^2)^2} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|}.$$

Residuum funkcji w jej biegunie drugiego rzędu wyznaczamy ze standardowego wzoru

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= \frac{d}{dz} \frac{\ln z}{(z + i|a|)^2} \Big|_{z=i|a|} \\ &= \left[\frac{1}{z(z + i|a|)^2} - \frac{2 \ln z}{(z + i|a|)^3} \right]_{z=i|a|} \\ &= \frac{i}{4|a|^3} \left(1 - \ln |a| - i \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

Zatem

$$i\pi \int_0^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + a^2)^2} + 2 \int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{(x^2 + a^2)^2} = 2\pi i \frac{i}{4|a|^3} \left(1 - \ln |a| - i \frac{\pi}{2} \right),$$

a stąd (co potwierdza program *Mathematica*)

$$\int_0^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + a^2)^2} = \frac{\pi}{4|a|^3}, \quad \int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{(x^2 + a^2)^2} = \frac{\pi}{4|a|^3} (-1 + \ln |a|).$$

Oczywiście te same wyniki można też otrzymać różniczkując odpowiednio po parametrze uzyskane wcześniej już całki:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + a^2)^2} &= -\frac{d}{da^2} \int_0^{\infty} \frac{dx}{x^2 + a^2} = -\frac{d}{da^2} \left(\frac{\pi}{2\sqrt{a^2}} \right), \\ \int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{(x^2 + a^2)^2} &= -\frac{d}{da^2} \int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} = -\frac{d}{da^2} \left(\frac{\pi}{4\sqrt{a^2}} \ln a^2 \right). \end{aligned}$$

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{(x - a)^2 + b^2}.$$

Rozwiązanie: Ponieważ funkcja mnożąca logarytm nie jest parzysta, całkujemy po konturze “dziurka od klucza” z rysunku 8 funkcję

$$f(z) = \frac{\ln^2 z}{(z - a)^2 + b^2} = \frac{\ln^2 z}{(z + a - i|b|)(z + a + i|b|)}.$$

Jak zwykle całki po dużym okręgu o promieniu R i po małym okręgu o promieniu ε znikają w granicy $R \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$ i po uporządkowaniu granic całek otrzymujemy związek

$$\begin{aligned} -4\pi i \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{(x-a)^2 + b^2} + 4\pi^2 \int_0^\infty \frac{dx}{(x-a)^2 + b^2} \\ = 2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{z=-a+i|b|} + \operatorname{res} f(z)|_{z=-a-i|b|} \right). \end{aligned}$$

Residua funkcji w punktach $z_\pm = -a \pm i|b|$ znajdujemy standardowo:

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=-a \pm i|b|} = \frac{(i\varphi_\pm + \ln \sqrt{a^2 + b^2})^2}{\pm 2i|b|}.$$

φ_+ i φ_- są tu fazami punktów z_+ i z_- (wyznaczanymi zgodnie z rozcięciem płaszczyzny), których moduły są jednakowe, $|z_\pm| = \sqrt{a^2 + b^2}$. Ponieważ

$$2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{z=-a+i|b|} + \operatorname{res} f(z)|_{z=-a-i|b|} \right) = \frac{\pi}{|b|} \{ 2i(\varphi_+ - \varphi_-) \ln |z_\pm| + \varphi_-^2 - \varphi_+^2 \},$$

otrzymujemy związki

$$\begin{aligned} \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{(x-a)^2 + b^2} &= \frac{1}{4|b|} (\varphi_- - \varphi_+) \ln(a^2 + b^2), \\ \int_0^\infty \frac{dx}{(x-a)^2 + b^2} &= \frac{1}{4\pi|b|} (\varphi_-^2 - \varphi_+^2). \end{aligned}$$

Jeśli $a > 0$, to, jak łatwo się zorientować,

$$\varphi_\pm = \pi \mp \arctg(|b|/a),$$

i $\varphi_- - \varphi_+ = 2 \arctg(|b|/a)$. Jeśli zaś $a < 0$, to

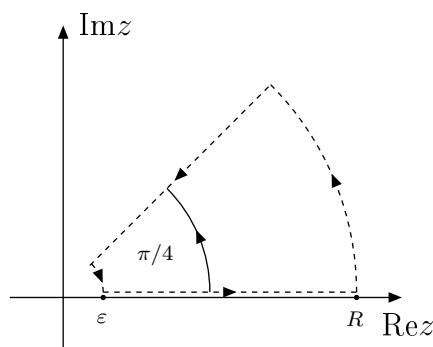
$$\varphi_+ = \arctg(|b|/|a|), \quad \varphi_- = 2\pi - 2 \arctg(|b|/|a|),$$

i $\varphi_- - \varphi_+ = 2(\pi - \arctg(|b|/|a|))$. Tak więc

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{(x-a)^2 + b^2} = \frac{\pi}{2|b|} \ln(a^2 + b^2) \times \begin{cases} \arctg(|b|/|a|), & \text{gdy } a > 0 \\ \pi - \arctg(|b|/|a|), & \text{gdy } a < 0 \end{cases}.$$

i podobnie

$$\int_0^\infty \frac{dx}{(x-a)^2 + b^2} = \frac{1}{|b|} \times \begin{cases} \arctg(|b|/|a|), & \text{gdy } a > 0 \\ \pi - \arctg(|b|/|a|), & \text{gdy } a < 0 \end{cases}.$$



Rysunek 9: Kontur całkowania Γ .

Zadanie

Otrzymać dwie całki rzeczywiste z logarytmami obliczając całkę

$$\oint_{\Gamma} dz \frac{\ln z}{z^2 + a^2}$$

po konturze Γ pokazanym na rysunku 9 w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$.

Rozwiązanie: Jak zwykle całki po obu łukach znikają w podwójnej granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ i otrzymujemy równość

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} + \int_{\infty}^0 dr e^{i\pi/4} \frac{\ln r + i\pi/4}{ir^2 + a^2} = 0,$$

(na skośnym fragmencie konturu $z = |r|e^{i\pi/4}$), jako, że wewnątrz “klina” całkowana funkcja $(z^2 + a^2)^{-1} \ln z$ jest holomorphyzna (ma ona bieguny w $z = \pm ia$, czyli poza konturem).

Mamy zatem (po odpowiednim obróceniu granic i wyciągnięciu i z mianownika)

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{x^2 + a^2} + i e^{i\pi/4} \int_0^{\infty} dr \frac{\ln r}{r^2 - ia^2} - e^{i\pi/4} \frac{\pi}{4} \int_0^{\infty} \frac{dr}{r^2 - ia^2} = 0,$$

Pierwszą całkę już obliczyliśmy w poprzednich zadaniach (wynik: $(\pi/2|a|) \ln |a|$). Wykorzystując tożsamość $1/(x^2 - ia^2) = (x^2 + ia^2)/(x^4 + a^4)$ możemy więc napisać

$$\begin{aligned} i e^{i\pi/4} \int_0^{\infty} dx \frac{x^2 \ln x}{x^4 + a^4} - e^{i\pi/4} a^2 \int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{x^4 + a^4} \\ = e^{i\pi/4} \frac{\pi}{4} \int_0^{\infty} dx \frac{x^2}{x^4 + a^4} + i e^{i\pi/4} \frac{\pi}{4} a^2 \int_0^{\infty} \frac{dx}{x^4 + a^4} - \frac{\pi}{2|a|} \ln |a|. \end{aligned}$$

Całki po prawej stronie można obliczyć metodą residuów rozciągając je na całą oś rzeczywistą (i biorąc połowę tego, co wyjdzie) i domykając kontur półokręgiem np. w górnej półpłaszczyźnie, jak na rysunku 2. Wewnątrz takiego konturu mamy wtedy po dwa bieguny pierwszego rzędu w $z_1 = (-1 + i)|a|/\sqrt{2}$ oraz $z_2 = (1 + i)|a|/\sqrt{2}$. Wykorzystując rozkład

$$z^4 + 1 = (z - z_1)(z - z_2)(z^2 + i\sqrt{2}|a|z - a^2),$$

łatwo znajdujemy ($z_1^2 = -ia^2$, $z_2^2 = ia^2$), że:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1,2} \operatorname{res} \frac{1}{z^4 + a^4} \Big|_{z=z_i} &= \frac{1}{2\sqrt{2}(1+i)|a|^3} + \frac{1}{-2\sqrt{2}(1-i)|a|^3} = \frac{-i}{2\sqrt{2}|a|^3}, \\ \sum_{i=1,2} \operatorname{res} \frac{z^2}{z^4 + a^4} \Big|_{z=z_i} &= \frac{-ia^2}{2\sqrt{2}(1+i)|a|^3} + \frac{ia^2}{-2\sqrt{2}(1-i)|a|^3} = \frac{-i}{2\sqrt{2}|a|}.\end{aligned}$$

Mamy więc (wykorzystaliśmy parzystość funkcji pod całkami po prawej stronie i pomnożyliśmy obie strony przez $e^{-i\frac{\pi}{4}} = (1-i)/\sqrt{2}$)

$$\begin{aligned}i \int_0^\infty dx \frac{x^2 \ln x}{x^4 + a^4} - a^2 \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^4 + a^4} \\ = \frac{\pi}{8} \int_{-\infty}^\infty dx \frac{x^2}{x^4 + a^4} + i \frac{\pi}{8} a^2 \int_{-\infty}^\infty \frac{dx}{x^4 + a^4} - \frac{\pi}{2|a|} \frac{1-i}{\sqrt{2}} \ln |a| \\ = \frac{\pi}{8} \frac{2\pi}{2\sqrt{2}|a|} + i \frac{\pi}{8} \frac{2\pi}{2\sqrt{2}|a|} - \frac{\pi}{2|a|} \frac{1-i}{\sqrt{2}} \ln |a|.\end{aligned}$$

Przyrównując części rzeczywiste i urojone obu stron otrzymujemy stąd dwa wyniki (sprawdzone programem *Mathematica*):

$$\begin{aligned}\int_0^\infty dx \frac{x^2 \ln x}{x^4 + a^4} &= \frac{\pi^2 + 4\pi \ln |a|}{8\sqrt{2}|a|}, \\ \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{x^4 + a^4} &= \frac{-\pi^2 + 4\pi \ln |a|}{8\sqrt{2}|a|^3}.\end{aligned}$$

W zależności od wartości $|a|$, całki mogą być dodatnie bądź ujemne. Np. dla $|a| = 1$ druga całka jest ujemna, gdyż skutek silnego tłumienia przez mianownik, gdy $x \gg 1$, dominujący przyczynek do niej wnosi obszar x -ów blisko zera, w którym to obszarze logarytm jest ujemny. W pierwszej zaś całce czynnik x^2 w liczniku powoduje, że przyczynek od tego obszaru wchodzi ze znacznie mniejszą wagą i całka jest dodatnia.

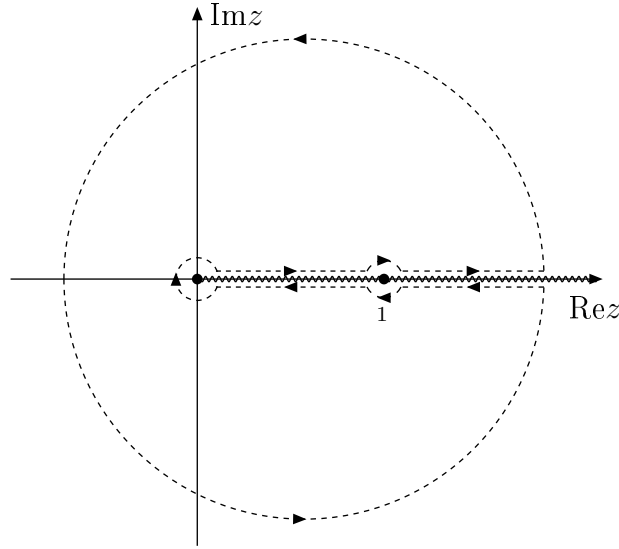
Zadanie

Metodą residuów obliczyć całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{(x-1)(x^2+1)}.$$

Rozwiązanie: Mimo pozornej osobliwości w $x = 1$ całka ta jest zbieżna bezwzględnie, gdyż w tym samym punkcie zeruje się także logarytm. Niemniej przy jej obliczaniu metodą residuów trzeba tę pozorną osobliwość wyizolować. W związku z tym zastąpimy kontur typu “dziurka od klucza” z rysunku 8 (ponieważ funkcja mnożąca logarytm nie jest parzysta, nie możemy skorzystać z konturu typu ODS) konturem Γ' pokazanym na rysunku 10 i scałkujemy po nim jak zwykle funkcję

$$f(z) = \frac{\ln^2 z}{(z-1)(z^2+1)}.$$



Rysunek 10: Będący modyfikacją “dziurki od klucza” kontur Γ' omijający biegun położony na rozcięciu (oznaczonym linią falistą). Promienie ε małych okręgów obiegających $z = 0$ i $z = 1$ dążą do zera; promień R dużego okręgu dąży do nieskończoności.

Jak zwykle w granicy $R \rightarrow \infty$ znika całka po dużym okręgu, a gdy $\varepsilon \rightarrow 0$, znika także całka po okręgu obiegającym punkt $z = 0$ (pokazuje się to tak samo jak w poprzednich przykładach). Pozostaje zatem zbadać całki po dwóch półokręgach obiegających punkt $z = 1$. Na górnym $z = 1 + \varepsilon e^{i\varphi}$ i

$$\int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^{+}(1)}^{\text{góra}} dz f(z) = \int_{\pi}^0 d\varphi i\varepsilon e^{i\varphi} \frac{\ln^2(1 + \varepsilon e^{i\varphi})}{\varepsilon e^{i\varphi}[1 + (1 + \varepsilon e^{i\varphi})^2]} \rightarrow 0,$$

gdy $\varepsilon \rightarrow 0$. Na dolnym zaś, zgodnie z definicją logarytmu na płaszczyźnie z rozcięciem, $z = e^{2\pi i}(1 + \varepsilon e^{i\varphi})$ i w tej samej granicy otrzymujemy

$$\int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^{-}(1)}^{\text{dół}} dz f(z) = \int_{2\pi}^{\pi} d\varphi i \frac{[2\pi i + \ln(1 + \varepsilon e^{i\varphi})]^2}{1 + (1 + \varepsilon e^{i\varphi})^2} \rightarrow -\pi i \frac{1}{2}(-4\pi^2).$$

W granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ z twierdzenia o residuach otrzymujemy zatem (po przeniesieniu na drugą stronę przyczynku wnoszonego przez całkę po okręgu obiegającego punkt $z = 1$) równość

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} dx \frac{\ln^2 x}{(x-1)(x^2+1)} + P \int_{\infty}^0 dx \frac{(2\pi i + \ln x)^2}{(x-1)(x^2+1)} \\ = 2\pi i \left(-\pi^2 + \text{res } f(z)|_{z=e^{i\frac{\pi}{2}}} + \text{res } f(z)|_{z=e^{i\frac{3\pi}{2}}} \right). \end{aligned}$$

Przed drugą całką dopisaliśmy tu znak P oznaczający całkę w sensie wartości głównej, gdyż część bez logarytmu tej całki nie jest bezwzględnie zbieżna.

Residua (oba bieguny są pierwszego rzędu) znajdujemy standardowo:

$$\begin{aligned}\operatorname{res} f(z)|_{z=e^{i\frac{\pi}{2}}} &= \frac{\ln^2(e^{i\frac{\pi}{2}})}{(i-1)2i} = \frac{\pi^2}{16}(1-i), \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=e^{i\frac{3\pi}{2}}} &= \frac{\ln^2(e^{i\frac{3\pi}{2}})}{(-i-1)(-2i)} = \frac{9\pi^2}{16}(1+i).\end{aligned}$$

Po rozpisaniu i obróceniu granic całki z $\ln^2 x$ ulegają redukcji i wynikająca z twierdzenia o residuach równość przyjmuje postać

$$-4\pi i \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{(x-1)(x^2+1)} - 4\pi^2 P \int_0^\infty \frac{dx}{(x-1)(x^2+1)} = 2\pi i \left(-\pi^2 + \frac{\pi^2}{8}(5+4i) \right),$$

z której otrzymujemy dwie całki rzeczywiste. Pierwszą, której szukaliśmy:

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{(x-1)(x^2+1)} = \frac{3}{16}\pi^2,$$

(potwierdzaną przez program *Mathematica*) oraz drugą

$$P \int_0^\infty \frac{dx}{(x-1)(x^2+1)} = -\frac{\pi}{4},$$

którą możemy sprawdzić niezależnie: rozkładamy funkcję podcałkową na UAMki proste

$$\frac{1}{(x-1)(x^2+1)} = \frac{1}{2} \frac{1}{x-1} - \frac{1}{2} \frac{x}{x^2+1} - \frac{1}{2} \frac{1}{x^2+1},$$

i piszemy

$$P \int_0^\infty \frac{dx}{(x-1)(x^2+1)} = \frac{1}{2} \int_0^{1-\delta} \frac{dx}{x-1} + \frac{1}{2} \int_{1+\delta}^\Lambda \frac{dx}{x-1} - \frac{1}{2} \int_0^\Lambda dx \frac{x}{x^2+1} - \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{dx}{x^2+1}.$$

Rozbicie funkcji podcałkowej na ułamki proste spowodowało, że niektóre z całek stały się rozbieżne dla $x \rightarrow \infty$; aby sobie z tym poradzić wprowadziliśmy ich regularyzację “w ultrafiolecie” w postaci obcięcia Λ (w kwantowej teorii pola takie rzeczy są na porządku dziennym). Ponieważ wyjściowa całka była zbieżna dla $x \rightarrow \infty$, oczekujemy, że wynik będzie skończony w granicy $\Lambda \rightarrow \infty$. Z kolei czynnik δ regularyzuje całki rozbieżne w $x = 1$ zgodnie z przepisem na obliczanie wartości głównej (w niedzielę na Głównym). Całki są elementarne i dają

$$P \int_0^\infty \frac{dx}{(x-1)(x^2+1)} = \frac{1}{2} \ln \frac{-\delta}{-1} + \frac{1}{2} \ln \frac{\Lambda-1}{\delta} - \frac{1}{4} \ln \frac{\Lambda^2+2}{1} - \frac{\pi}{4}.$$

Jak łatwo zobaczyć, zależność od δ wypada, a w granicy $\Lambda \rightarrow \infty$ redukują się wyrazy z $\ln \Lambda$ (pozostałości znikają conajmniej jak $1/\Lambda$) i otrzymujemy ten sam wynik, co metodą residuów.

Zadanie

Obliczyć metodą residuów całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{x^2}{\operatorname{sh}^2 x},$$

sprowadzając ją do całki z kwadratem logarytmu i całkując odpowiednią funkcję po odpowiednim konturze.

Rozwiązanie: Podstawiając $y = e^{2x}$ otrzymujemy

$$\int_0^\infty dx \frac{x^2}{\operatorname{sh}^2 x} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^\infty dx \frac{x^2}{\operatorname{sh}^2 x} = \frac{1}{4} \int_0^\infty dy \frac{\ln^2 y}{(y-1)^2}.$$

Całka ta jest dobrze określona, mimo pozornego podwójnego zera mianownika w $y = 1$: w tym samym punkcie podwójne zero ma bowiem też licznik. Ponieważ funkcja mnożąca logarytm nie jest parzysta, trzeba posłużyć się konturem typu “dziurka od klucza” i to “z gulka”, takim jak na rysunku 10, gdyż konieczne jest wyizolowanie pozornej osobliwości leżącej na rozcięciu. Po konturze tym nauczeni doświadczeniem całkujemy funkcję

$$f(z) = \frac{\ln^3 z}{(z-1)^2}.$$

W standardowy sposób pokazujemy, że w granicy $R \rightarrow \infty$ znika całka po dużym okręgu o promieniu R , a w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ znika całka po małym okręgu (o promieniu ε) obiegającym punkt $z = 0$. Z małym okręgiem izolującym punkt $z = 1$ trzeba jednak postępować ostrożnie. Nietrudno sprawdzić, że w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ znika także całka po górnej części tego okręgu. Na tej części $z = 1 + \varepsilon e^{i\varphi}$ i

$$\begin{aligned} \int_{\frac{1}{2}K_\varepsilon^-(1)}^{\text{góra}} dz f(z) &= \int_\pi^0 d\varphi i\varepsilon e^{i\varphi} \frac{\ln^3(1 + \varepsilon e^{i\varphi})}{(\varepsilon e^{i\varphi})^2} \\ &= i \int_\pi^0 d\varphi e^{-i\varphi} \frac{1}{\varepsilon} \left(\varepsilon e^{i\varphi} - \frac{1}{2} (\varepsilon e^{i\varphi})^2 + \dots \right)^3 \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Ponieważ poza rozcięciem funkcja $f(z)$ jest holomorficzna, zgodnie z regułą przedłużania logarytmu na dolny brzeg rozcięcia piszemy:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty dx \frac{\ln^3 x}{(x-1)^2} + \int_\infty^{1+\varepsilon} dx \frac{(2\pi i)^3 + 3(2\pi i)^2 \ln x + 3(2\pi i) \ln^2 + \ln^3 x}{(x-1)^2} \\ + \int_{1-\varepsilon}^0 dx \frac{(2\pi i)^3 + 3(2\pi i)^2 \ln x + 3(2\pi i) \ln^2 + \ln^3 x}{(x-1)^2} + \int_{\frac{1}{2}K_\varepsilon^-(1)}^{\text{dół}} dz f(z) = 0. \end{aligned}$$

Po odwróceniu granic całkowania można we wszystkich całkach z trzecią i drugą potęgą logarytmu położyć $\varepsilon = 0$; całki z $\ln^3 x$ ulegają wtedy redukcji i otrzymujemy

$$\begin{aligned} \int_{\frac{1}{2}K_\varepsilon^-(1)}^{\text{dół}} dz f(z) - (2\pi i)^3 \int_0^{1-\varepsilon} \frac{dx}{(1-x)^2} - (2\pi i)^3 \int_{1+\varepsilon}^\infty \frac{dx}{(1-x)^2} \\ - 3(2\pi i)^2 \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{(x-1)^2} - 3(2\pi i) \int_0^\infty dx \frac{\ln^2 x}{(x-1)^2} = 0. \end{aligned}$$

Zamiast dwu całek z pierwszą potęgą logarytmu, jednej od 0 do $-\varepsilon$ i drugiej od $1 + \varepsilon$ do ∞ , napisaliśmy tu jedną całkę opatrzoną symbolem wartości głównej; całka ta nie jest bezwzględnie zbieżna ale procedura omijania położonego na rozcięciu bieguna w $z = 1$ przez rozbitcie jej na wspomniane dwie całki powoduje, że należy rozumieć ją w tym właśnie sensie.

Dolną część półokręgu otaczającego $z = 1$, zgodnie z procedurą przedłużania logarytmu, parametryzujemy następująco:

$$z = e^{2\pi i} (1 + \varepsilon e^{i\varphi}) .$$

Całka po tym fragmencie konturu daje wtedy

$$\begin{aligned} \int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^{-}(1)}^{\text{dół}} dz f(z) &= i \int_{2\pi}^{\pi} d\varphi \varepsilon^{-1} e^{-i\varphi} [2\pi i + \ln(1 + \varepsilon e^{i\varphi})]^3 \\ &= i \int_{2\pi}^{\pi} d\varphi \varepsilon^{-1} e^{-i\varphi} \left[2\pi i + \varepsilon e^{i\varphi} + \frac{1}{2} (\varepsilon e^{i\varphi})^2 + \dots \right]^3 \\ &= \frac{i}{\varepsilon} (2\pi i)^3 \int_{2\pi}^{\pi} d\varphi e^{-i\varphi} + 3i(2\pi i)^2 \int_{2\pi}^{\pi} d\varphi + \mathcal{O}(\varepsilon) , \end{aligned}$$

gdzie $\mathcal{O}(\varepsilon)$ oznacza wyrazy znikające w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$. Obliczając widniejące tu całki oraz pozostałe dwie elementarne całki w pierwszej linii poprzedniej równości, otrzymujemy związek:

$$\begin{aligned} \frac{i}{\varepsilon} (2\pi i)^3 i (e^{-\pi i} - e^{-2\pi i}) - 3i(2\pi i)^2 \pi + (2\pi i)^3 \left(\frac{1}{x-1} \Big|_{1+\varepsilon}^{\infty} + \frac{1}{x-1} \Big|_0^{1-\varepsilon} \right) \\ - 3(2\pi i)^2 P \int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{(x-1)^2} - 3(2\pi i) \int_0^{\infty} dx \frac{\ln^2 x}{(x-1)^2} = 0 , \end{aligned}$$

którego pierwsza linia, po wzięciu granic, jest równa

$$\frac{2}{\varepsilon} (2\pi i)^3 - 3i(2\pi i)^2 \pi + (2\pi i)^3 \left(1 - \frac{2}{\varepsilon} \right) = 4i\pi^3 .$$

Jak widać wszystkie wyrazy osobliwe, gdy $\varepsilon \rightarrow 0$, skróciły się! Ponieważ całka z pierwszą potęgą logarytmu daje człon czysto rzeczywisty, a reszta wyrazów jest czysto urojona, wnosimy stąd, że

$$P \int_0^{\infty} dx \frac{\ln x}{(x-1)^2} = 0 ,$$

oraz, że

$$\int_0^{\infty} dx \frac{\ln^2 x}{(x-1)^2} = \frac{2}{3} \pi^2 .$$

Oba wyniki potwierdza program *Mathematica*.⁸ Ostatecznie więc

$$\int_0^\infty dx \frac{x^2}{\operatorname{sh}^2 x} = \frac{\pi^2}{6}.$$

Zadanie

Obliczyć metodą residuów całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln(1+x^2)}{1+x^2}.$$

Rozwiązanie: Ponieważ funkcja mnożąca logarytm jest parzysta spróbujemy wykorzystać jakiś kontur biegnący po całej osi rzeczywistej. Jednakże funkcja $\ln(1+z^2)$ miałaby dwa punkty osobliwe (punkty rozgałęzienia) w $z = \pm i$, które wymagałyby rozcięcia płaszczyzny zespolonej zmiennej z . Można byłoby rozciąć ją dwiema liniami biegnącymi niezależnie od każdego z tych punktów do nieskończoności. To jednak uniemożliwiłoby domknięcie konturu biegnącego po osi rzeczywistej jakimkolwiek półokręgiem o promieniu R dążącym do nieskończoności. Z drugiej strony rozcięcie łączące punkt $z = i$ z punktem $z = -i$ uniemożliwiłoby poprowadzenie konturu po osi rzeczywistej. Trzeba więc uciec się do jakiegoś wybiegu. Spróbujemy zatem całkować po konturze z rysunku 2 funkcję

$$g(z) = \frac{\ln(z+i)}{1+z^2},$$

która ma tylko jeden punkt rozgałęzienia w $z = -i$, co umożliwia poprowadzenie rozcięcia od tego punktu do nieskończoności np. wzdłuż dolnej części osi urojonej (tj. poza konturem całkowania). Logarytm można wtedy zdefiniować tak, by dla $z = x > 0$ był po prostu zwykłym logarytmem.

W sposób standardowy pokazujemy następnie, że całka po półokręgu znika w granicy $R \rightarrow \infty$. Z twierdzenia o residuach mamy więc równość

$$\int_{-\infty}^0 dx \frac{\ln(|x|e^{i\pi} + e^{i\frac{\pi}{2}})}{1+x^2} + \int_0^\infty dx \frac{\ln(x + e^{i\frac{\pi}{2}})}{1+x^2} = 2\pi i \operatorname{res} g(z)|_{z=i}.$$

Pierwszą całkę możemy przepisać jak następuje:

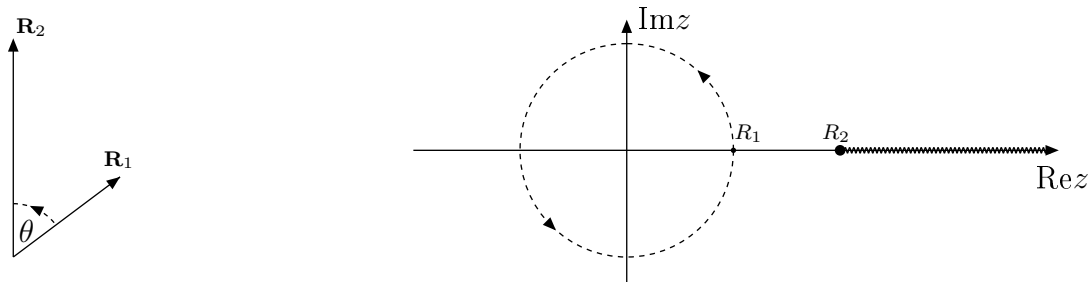
$$\int_{-\infty}^0 dx \frac{\ln(|x|e^{i\pi} + e^{i\frac{\pi}{2}})}{1+x^2} = \int_{-\infty}^0 dx \frac{i\pi + \ln(|x| + e^{-i\frac{\pi}{2}})}{1+x^2} = \int_0^\infty dx \frac{i\pi + \ln(x-i)}{1+x^2}.$$

W drugim kroku dokonaliśmy zamiany zmiennych $x \rightarrow -x$ i obróciliśmy granice całkowania. Połączenie teraz obu całek da akurat pożądaną funkcję $\ln(1+x^2)$.

Residuum funkcji $g(z)$ łatwo znaleźć:

$$\operatorname{res} g(z)|_{z=i} = \left. \frac{\ln(z+i)}{z+i} \right|_{z=i} = \frac{-i}{2} \ln(2e^{i\frac{\pi}{2}}) = \frac{-i}{2} \ln 2 + \frac{\pi}{4}.$$

⁸Oczywiście pierwszą całkę można też obliczyć przez części w granicach od δ do $1-\varepsilon$ i od $1+\varepsilon$ do ∞ i sprawdzić jej znikanie wykonując przejście graniczne $\varepsilon \rightarrow 0$, $\delta \rightarrow 0$.



Rysunek 11: Definicja kąta pomiędzy wektorami $\mathbf{R}_1$ i $\mathbf{R}_2$ oraz kontur całkowania funkcji $f(\theta) = \ln |\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2|$.

Mamy więc związek

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln(1+x^2)}{1+x^2} + i\pi \int_0^\infty \frac{dx}{1+x^2} = 2\pi i \left(\frac{-i}{2} \ln 2 + \frac{\pi}{4} \right),$$

który daje dwie całki rzeczywiste (potwierdzone przez program *Mathematica*):

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln(1+x^2)}{1+x^2} = \pi \ln 2, \quad \int_0^\infty \frac{dx}{1+x^2} = \frac{\pi}{2}.$$

Zadanie

Obliczyć całkę

$$I = \int_0^{2\pi} d\theta \ln |\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2|,$$

w której θ jest kątem pomiędzy wektorami $\mathbf{R}_1$ i $\mathbf{R}_2$ (rysunek 11).

Rozwiązanie: Całkowaną funkcję trzeba zapisać w taki sposób, by po przejściu do zmiennej zespolonej stała się ona funkcją holomorficzną (w pewnym obszarze płaszczyzny zespolonej zmiennej z). Jak łatwo sprawdzić, logarytmowany czynnik można zapisać w postaci

$$|\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2| \equiv \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \theta} = |R_1 e^{i\theta} - R_2|^2.$$

Pozwala to zapisać całkę następująco:

$$I = 2\operatorname{Re} \int_0^{2\pi} d\theta \ln (R_1 e^{i\theta} - R_2).$$

Naturalnym krokiem jest wprowadzenie następnie zmiennej $z = R_1 e^{i\theta}$ i całkowanie po zamkniętym konturze będącym okręgiem o promieniu R_1 obiegającym punkt $z = 0$. Trzeba jednak zdefiniować logarytm pod całką (tj. rozcięcie płaszczyzny zespolonej zmiennej z)

tak, by był on jednoznaczna funkcją z w całym dysku $|z| \leq R_1$ (i na jego brzegu). Jest to możliwe, jeśli $R_2 > R_1$: rozcięcie można wtedy poprowadzić tak, jak na rysunku 11. Mamy wtedy całkę

$$I = 2\operatorname{Re} \oint_{|z|=R_1} \frac{dz}{iz} \ln(z - R_2).$$

Funkcja ta ma biegun prosty w $z = 0$. Wobec tego, zgodnie z twierdzeniem o residuach,

$$I = 2\operatorname{Re} \left(2\pi i \operatorname{res} \frac{\ln(z - R_2)}{iz} \Big|_{z=0} \right).$$

Biorąc pod uwagę przyjętą tu definicję logarytmu

$$\operatorname{res} \frac{\ln(z - R_2)}{iz} \Big|_{z=0} = \frac{1}{i} \lim_{z \rightarrow 0} \ln(z - R_2) = \frac{1}{i} \ln(R_2 e^{i\pi}) = \frac{1}{i} (\ln R_2 + i\pi).$$

Jeśli $R_2 < R_1$, to wektory zamieniają się rolami. W rezultacie

$$\int_0^{2\pi} d\theta \ln |\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2| = \begin{cases} 4\pi \ln R_2 & \text{gdy } R_2 > R_1 \\ 4\pi \ln R_1 & \text{gdy } R_2 < R_1 \end{cases}.$$

Przypomnienie

Funkcje postaci

$$f(z) = (z - a)^\alpha, \quad g(z) = (b - z)^\beta$$

o wykładnikach $\alpha, \beta \notin \mathbb{Z}$ nie mogą być określone na całej płaszczyźnie zespolonej zmiennej z . Punkty $z = a$ i $z = b$ są *punktami rozgałęzienia* tych funkcji. Po pierwsze, jakkolwiek same liczby zespolone $z - a$ i $b - z$ można przedstawić w postaciach

$$z - a = r_a e^{i(\varphi_a + 2\pi n_a)}, \quad b - z = r_b e^{i(\varphi_b + 2\pi n_b)},$$

z dowolnymi $n_a \in \mathbb{Z}$ i $n_b \in \mathbb{Z}$ (są to te same liczby zespolone dla dowolnych n_a i n_b), to wartości $f(z)$ i $g(z)$ zależą od przyjętych wartości n_a i n_b . Po drugie, nawet jeśli przyjąć jakąś konkretną umowę dotyczącą wyboru wartości n_a i n_b , to i tak po obejściu przez argument z funkcji $f(z)$ i $g(z)$ dookoła punktu odpowiednio $z = a$ i $z = b$ (czyli po powrocie argumentu funkcji $f(z)$ do wyjściowej wartości), fazy φ_a i φ_b zmieniają się o 2π i wartości funkcji $f(z)$ i $g(z)$ będą się różniły od pierwotnych odpowiednio o czynniki $e^{i2\pi\alpha}$ i $e^{i2\pi\beta}$. Tak więc funkcje $f(z)$ i $g(z)$ (podobnie jak funkcja $\ln(z)$) nie mogą być holomorphyne (czyli m. in. ciągłe) na całej płaszczyźnie zespolonej zmiennej z .

Jeśli n_a (n_b) jest liczbą wymierną postaci k/m , to po m -krotnym obejściu przez z punktu $z = a$ ($z = b$) funkcja $f(z)$ ($g(z)$) wraca do swojej wyjściowej wartości; funkcję taką można zdefiniować jako jednoznaczna na m -krotnie nawijającej się wokół punktu $z = a$ ($z = b$) powierzchni Riemanna o m płatach. Jeśli n_a (n_b) nie jest liczbą wymierną,

to odpowiednia powierzchnia Riemanna ma nieskończenie wiele płatów nawijających się wokół punktu $z = a$ ($z = b$). Zawsze, niezależnie od tego, czy liczba α (β) jest wymierna, czy nie, można funkcję $f(z)$ ($g(z)$) zdefiniować jako jednoznaczna (po przyjęciu jakiejś umowy co do n_a lub n_b) na płaszczyźnie zespolonej zmiennej z mającej rozcięcie biegnące (w dowolny sposób ciągle) od $z = a$ ($z = b$) do $z = \infty$.

Gdy a jest liczbą rzeczywistą zwykle przyjmuje się rozcięcie biegnące od $z = a$ po osi rzeczywistej w prawo do $z = \infty$, a fazę liczby zespolonej z określa się w ten sposób, by fazy liczb postaci $z = x + i0$, gdzie $x > a$ były równe zero.

Zadanie

Obliczyć metodą residuów całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{\sqrt{x}(x+1)}.$$

Rozwiązanie: Całka jest oczywiście zbieżna (według standardowych kryteriów). Ponieważ w punkcie $z = 0$ zarówno logarytm jak i funkcja go mnożąca (pierwiastek) mają punkt rozgałęzienia, możemy jednoznacznie określić funkcję podcałkową na płaszczyźnie zespolonej zmiennej z mającej rozcięcie biegnące od $z = 0$ wzdłuż osi rzeczywistej do nieskończoności. Możemy wtedy spróbować wykorzystać kontur typu “dziurka od klucza” z rysunku 8 i całkować po nim funkcję⁹

$$f(z) = \frac{\ln z}{\sqrt{z}(z+1)}.$$

W granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ całki po obu okręgach znikają. Wewnątrz konturu funkcja ma tylko jeden biegun prosty w $z = -1$. Z twierdzenia o residuach otrzymujemy zatem równość

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{\sqrt{x}(x+1)} + \int_\infty^0 dx \frac{\ln(xe^{2i\pi})}{(xe^{2i\pi})^{1/2}(x+1)} = 2\pi i e^{-i\frac{\pi}{2}} \ln(e^{i\pi}),$$

czyli, po uporządkowaniu,

$$2 \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{\sqrt{x}(x+1)} + 2\pi i \int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{x}(x+1)} = 2i\pi^2.$$

Ponieważ prawa strona jest czysto urojona, szukana całka wynosi zero. Niezerowa jest za to całka (oba wnioski potwierdza program *Mathematica*)¹⁰

$$\int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{x}(x+1)} = \pi.$$

⁹Zauważmy, że teraz dodatkowa faza czynnika $\sqrt{z}$ spowoduje, że całka z logarytmem po dolnej krawędzi rozcięcia nie skróci się z analogiczną całką po górnej krawędzi; dzięki temu nie musimy, tak jak w przypadku funkcji wymiernych mnożących logarytm, brać wyższej potęgi logarytmu.

¹⁰Całkę tę można oczywiście obliczyć bezpośrednio, podstawiając $t = \sqrt{x}$.

Zadanie

Obliczyć metodą residuów całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln^2 x}{\sqrt{x}(x+1)}.$$

Rozwiązanie: Tak jak w poprzednim przykładzie możemy wykorzystać kontur typu “dziurka od klucza” z rysunku 8. W granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ całki po obu okręgach znikają. Wewnątrz konturu funkcja ma tylko jeden biegun prosty w $z = -1$. Podobnie jak wyżej otrzymujemy zatem równość

$$2 \int_0^\infty dx \frac{\ln^2 x}{\sqrt{x}(x+1)} - 4\pi^2 \int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{x}(x+1)} + 4\pi i \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{\sqrt{x}(x+1)} = 2\pi \ln^2(e^{i\pi}).$$

Ponieważ teraz prawa strona jest czysto rzeczywista, ponownie dowiadujemy się, że trzecia całka po lewej stronie (ta mnożona przez $4\pi i$) znika. Przenosząc zaś drugą całkę na prawą stronę i wykorzystując poprzednie zadanie otrzymujemy (znów zgadza się to z odpowiedzią programu *Mathematica*):

$$2 \int_0^\infty dx \frac{\ln^2 x}{\sqrt{x}(x+1)} = -2\pi^3 + 4\pi^2 \int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{x}(x+1)} = -2\pi^3 + 4\pi^3 = 2\pi^3.$$

Zadanie

Obliczyć metodą residuów całkę

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{\sqrt{x}(x^2 + a^2)^2}.$$

Rozwiązanie: Jak zwykle z całkami tego typu całkujemy po konturze “dziurka od klucza” z rysunku 8 funkcję

$$f(z) = \frac{\ln z}{\sqrt{z}(z^2 + a^2)^2}.$$

Całka po dużym okręgu znika w granicy $R \rightarrow \infty$, a w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ znika (bo $\varepsilon \varepsilon^{1/2} \ln \varepsilon \rightarrow 0$) całka po małym okręgu obiegającym punkt $z = 0$. W tej podwójnej granicy z twierdzenia o residuach mamy zatem równość:

$$\int_0^\infty dx \frac{\ln x}{\sqrt{x}(x^2 + a^2)^2} + \int_\infty^0 dx \frac{\ln(x e^{2\pi i})}{e^{i\pi} \sqrt{x}(x^2 + a^2)^2} = 2\pi i \sum_i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_i},$$

a po uporządkowaniu

$$2 \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{\sqrt{x}(x^2 + a^2)^2} + 2\pi i \int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{x}(x^2 + a^2)^2} = 2\pi i \sum_i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_i}.$$

Funkcja $f(z)$ ma wewnątrz konturu z rysunku 8 dwa bieguny drugiego rzędu w $z = \pm i|a|$. Aby znaleźć ich residua różniczkujemy:

$$\frac{d}{dz} f(z) = -\frac{1}{2} \frac{\ln z}{z^{3/2}(z \pm i|a|)^2} + \frac{1}{z^{3/2}(z \pm i|a|)^2} - \frac{2 \ln z}{z^{1/2}(z \pm i|a|)^3}.$$

i liczymy

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= (|a|e^{i\frac{\pi}{2}})^{-1/2} \left\{ -\frac{\ln(|a|e^{i\frac{\pi}{2}})}{2|a|i(2i|a|)^2} + \frac{1}{i|a|(2i|a|)^2} - \frac{2 \ln(|a|e^{i\frac{\pi}{2}})}{(2i|a|)^3} \right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{|a|}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \left\{ \frac{\ln |a|}{8i|a|^3} + \frac{\pi}{16|a|^3} - \frac{1}{4i|a|^3} + \frac{\ln |a|}{4i|a|^3} + \frac{\pi}{8|a|^3} \right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{|a|}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \left\{ \frac{3 \ln |a|}{8i|a|^3} + \frac{3\pi}{16|a|^3} - \frac{1}{4i|a|^3} \right\}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} &= (|a|e^{i\frac{3\pi}{2}})^{-1/2} \left\{ -\frac{\ln(|a|e^{i\frac{3\pi}{2}})}{-2|a|i(-2i|a|)^2} + \frac{1}{-i|a|(-2i|a|)^2} - \frac{2 \ln(|a|e^{i\frac{3\pi}{2}})}{(-2i|a|)^3} \right\} \\ &= \frac{-i}{\sqrt{|a|}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \left\{ -\frac{\ln |a|}{8i|a|^3} - \frac{3\pi}{16|a|^3} + \frac{1}{4i|a|^3} - \frac{\ln |a|}{4i|a|^3} - \frac{3\pi}{8|a|^3} \right\} \\ &= \frac{-i}{\sqrt{|a|}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \left\{ -\frac{3 \ln |a|}{8i|a|^3} - \frac{9\pi}{16|a|^3} + \frac{1}{4i|a|^3} \right\}. \end{aligned}$$

Zbierając te wyniki mamy

$$\sum_i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_i} = \frac{1-i}{\sqrt{2|a|}} \left\{ \frac{3 \ln |a|}{8i|a|^3} + \frac{3\pi}{16|a|^3} - \frac{1}{4i|a|^3} - i \left[-\frac{3 \ln |a|}{8i|a|^3} - \frac{9\pi}{16|a|^3} + \frac{1}{4i|a|^3} \right] \right\}.$$

Całka z logarytmem jest więc równa

$$\begin{aligned} \int_0^\infty dx \frac{\ln x}{\sqrt{x}(x^2+a^2)^2} &= \frac{\pi}{\sqrt{2|a|}} \left\{ \frac{3 \ln |a|}{8|a|^3} - \frac{1}{4|a|^3} - \frac{9\pi}{16|a|^3} + \frac{3\pi}{16|a|^3} + \frac{3 \ln |a|}{8|a|^3} - \frac{1}{4|a|^3} \right\} \\ &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}|a|^{7/2}} \left\{ -1 - \frac{3}{4}\pi + \frac{3}{2} \ln |a| \right\}. \end{aligned}$$

Dodatkowo otrzymujemy też drugą całkę

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{x}(x^2+a^2)^2} &= \frac{1}{\sqrt{2|a|}} \left\{ \frac{3\pi}{16|a|^3} + \frac{3 \ln |a|}{8|a|^3} - \frac{1}{4|a|^3} - \frac{3 \ln |a|}{8|a|^3} + \frac{1}{4|a|^3} + \frac{9\pi}{16|a|^3} \right\} \\ &= \frac{3\pi}{4\sqrt{2}|a|^{7/2}}. \end{aligned}$$

Oba wyniki można sprawdzić programem *Mathematica*.

Zadanie

Podać warunki zbieżności całki niewłaściwej

$$\int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1}}{ax+b},$$

i obliczyć ją metodą residuów wykorzystując kontur “dziurka od klucza” (rysunek 8). Rozparzyć zarówno przypadek $ab > 0$ jak i $ab < 0$.

Rozwiązanie: Dla $x \rightarrow 0$ oraz $x \rightarrow \infty$ całka zachowuje się odpowiednio jak

$$\sim \int_0^\infty dx x^{\beta-1}, \quad \text{oraz} \quad \sim \int_0^\infty dx x^{\beta-2}.$$

Zatem w przypadku, gdy $ab > 0$, tj. gdy w przedziale $(0, \infty)$ funkcja podcałkowa nie ma osobliwości, całka jest zbieżna, jeśli, co dalej zakładamy, $0 < \beta < 1$. Ponieważ funkcja $z^{\beta-1}$ ma w $z = 0$ punkt rozgałęzienia, funkcję podcałkową definiujemy na płaszczyźnie zespolonej zmiennej z mającej rozcięcie biegnące wzdłuż osi rzeczywistej od $z = 0$ do ∞ tak, by $(|x| + i0)^{\beta-1} = |x|^{\beta-1}$. Aby uprościć sobie sprawę dokonujemy przeskalowania zmiennej całkowania ($y = ax/b$):

$$\int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1}}{ax+b} = \frac{1}{a} \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} \int_0^\infty dy \frac{y^{\beta-1}}{1+y}.$$

i po konturze z rysunku 8 obiegającym rozcięcie całkujemy funkcję $f(z) = z^{\beta-1}/(z+1)$.

Szacujemy następnie w standardowy sposób całki po okręgach

$$\left| \int_{K_\varepsilon^-} dz f(z) \right| \leq \int_0^{2\pi} d\varphi \varepsilon \frac{\varepsilon^{\beta-1}}{1-\varepsilon} \rightarrow 0,$$

bo $\beta > 0$;

$$\left| \int_{K_R} dz f(z) \right| \leq \int_0^{2\pi} d\varphi R \frac{R^{\beta-1}}{R-1} = 2\pi \frac{R^\beta}{R-1} \rightarrow 0,$$

jako, że $\beta < 1$. W podwójnej granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ mamy zatem równość:

$$\int_0^\infty dy \frac{y^{\beta-1}}{1+y} + \int_\infty^0 dy \frac{y^{\beta-1} e^{2\pi i(\beta-1)}}{1+y} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=-1}.$$

Zgodnie z rozcięciem płaszczyzny i przyjętą definicją fazy, $z = -1 \equiv e^{i\pi}$. Residuum w $z = -1$ jest więc równe $e^{i\pi(\beta-1)}$ i po obróceniu granic drugiej całki otrzymujemy

$$(1 - e^{2\pi i(\beta-1)}) \int_0^\infty dy \frac{y^{\beta-1}}{1+y} = 2\pi i e^{i\pi(\beta-1)}.$$

Zatem

$$\int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1}}{1+x} = \frac{2\pi i}{1 - e^{2\pi i(\beta-1)}} e^{i\pi(\beta-1)} = \frac{\pi}{\sin[\pi(1-\beta)]} = \frac{\pi}{\sin(\pi\beta)},$$

czyli

$$\int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1}}{ax+b} = \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} \frac{\pi}{a \sin(\pi\beta)}, \quad \text{gdy } ab > 0.$$

Gdy $ab < 0$, całka nie istnieje w sensie ścisłym, ale można jej nadać sens przez przejście graniczne:

$$P \int_0^\infty dx \frac{y^{\beta-1}}{y-1} \equiv \left(\int_0^{1-\varepsilon} + \int_{1+\varepsilon}^\infty \right) dx \frac{y^{\beta-1}}{y-1}$$

(po odpowiednim przeskalowaniu zmiennej całkowania). Jest to całka w sensie wartości głównej (oczywiście warunek zbieżności całki na krańcach przedziału $[0, \infty)$, tj. $0 < \beta < 1$, pozostaje w mocy). Aby ją obliczyć, całkujemy funkcję $g(z) = z^{\beta-1}/(z-1)$ po konturze z rysunku 10 omijającym punkt osobiły położony na rozcięciu. Jako, że w obszarze otoczonym konturem Γ' funkcja $g(z)$ jest w tym przypadku holomorphyzna

$$\oint_{\Gamma'} dz g(z) = 0.$$

W rozbiciu całki po lewej stronie trzeba teraz jednak uwzględnić całki po półokręgach (o promieniach ε) obiegających punkt $z=1$ (całka po okręgu obiegającym punkt $z=0$ oraz całka po dużym okręgu znikają tak jak poprzednio). Na górnym półokręgu $z=1+\varepsilon e^{i\varphi}$ i

$$\int_{\frac{1}{2}K_\varepsilon^-(a)}^{\text{góra}} dz g(z) = \int_\pi^0 d\varphi i\varepsilon e^{i\varphi} \frac{(1+\varepsilon e^{i\varphi})^{\beta-1}}{\varepsilon e^{i\varphi}} \rightarrow -i\pi.$$

Na dolnym zaś $z=e^{2\pi i}(1+\varepsilon e^{i\varphi})$ i

$$\int_{\frac{1}{2}K_\varepsilon^-(a)}^{\text{dół}} dz g(z) = \int_{2\pi}^\pi d\varphi i\varepsilon e^{i\varphi} \frac{e^{2\pi(\beta-1)i}(1+\varepsilon e^{i\varphi})^{\beta-1}}{\varepsilon e^{i\varphi}} \rightarrow -i\pi e^{2\pi(\beta-1)i}.$$

Z twierdzenia o residuach otrzymujemy zatem związek

$$(1 - e^{2\pi i(\beta-1)}) P \int_0^\infty dy \frac{y^{\beta-1}}{1+y} = -i\pi (1 + e^{2\pi i(\beta-1)}),$$

tj. (wyniki dla obu znaków iloczynu ab potwierdza program *Mathematica*)

$$P \int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1}}{ax+b} = -\frac{\pi}{a} \left| \frac{b}{a} \right|^{\beta-1} \operatorname{ctg}(\pi\beta), \quad \text{gdy } ab < 0.$$

Zadanie

Podać warunki zbieżności całki niewłaściwej

$$\int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1} \ln x}{ax+b},$$

gdy $ab > 0$ i obliczyć ją metodą residuów wykorzystując kontur “dziurka od klucza” (rysunek 8).

Rozwiązanie: Warunki zbieżności całki są takie same jak w poprzednim zadaniu, tj. $0 < \beta < 1$, gdyż logarytm zachowuje się jak zerowa potęga x .

Całkujemy po konturze “dziurka od klucza” z rysunku 8 funkcję

$$f(z) = \frac{z^{\beta-1} \ln z}{az + b}.$$

Jak zwykle całka po małym okręgu obiegającym $z = 0$ i całka po dużym okręgu znikają w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$. Przedłużając standardowo $f(z)$ na dolny brzeg rozcięcia otrzymujemy w tej granicy związek

$$\oint_{\Gamma'} dz f(z) = \int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1} \ln x}{ax + b} + \int_\infty^0 dx \frac{e^{2\pi(\beta-1)i} x^{\beta-1} (2\pi i + \ln x)}{ax + b} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=-b/a}.$$

Residuum funkcji $f(z)$ w jedynym punkcie osobliwym znajdującym się wewnątrz konturu Γ' jest równe

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=-b/a} = \frac{1}{a} \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} e^{i\pi(\beta-1)} \left(i\pi + \ln \frac{b}{a}\right).$$

Po uporządkowaniu granic całek i przeniesieniu całki bez logarytmu na drugą stronę dostajemy zatem związek

$$(1 - e^{2\pi(\beta-1)i}) \int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1} \ln x}{b + ax} = \frac{2\pi i}{a} \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} e^{i\pi(\beta-1)} \left(i\pi + \ln \frac{b}{a}\right) + 2\pi i e^{2\pi(\beta-1)i} \int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1}}{b + ax}.$$

Całka występująca w drugiej linii została obliczona w poprzednim zadaniu. Mamy więc

$$\int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1} \ln x}{b + ax} = \frac{\pi}{a} \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} \frac{i\pi + \ln(b/a)}{\sin(\pi\beta)} + \frac{2\pi i e^{2\pi(\beta-1)i}}{1 - e^{2\pi(\beta-1)i}} \frac{\pi}{a} \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} \frac{1}{\sin(\pi\beta)},$$

i po uporządkowaniu

$$\int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1} \ln x}{b + ax} = \frac{\pi}{a} \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} \frac{\ln(b/a)}{\sin(\pi\beta)} - \frac{\pi^2}{a} \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} \frac{\cos(\pi\beta)}{\sin^2(\pi\beta)}.$$

Zauważmy na koniec, że skoro i tak trzeba było wykorzystać wynik całki obliczonej w poprzednim zadaniu, to można to było zrobić też inaczej, zauważając po prostu, że

$$\int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1} \ln x}{b + ax} = \frac{d}{d\beta} \int_0^\infty dx \frac{x^{\beta-1}}{b + ax} = \frac{d}{d\beta} \left(\frac{b}{a}\right)^{\beta-1} \frac{\pi}{a \sin(\pi\beta)},$$

co prowadzi natychmiast do powyższego wyniku.

Zadanie

Podać warunki zbieżności całki niewłaściwej

$$\int_0^\infty dx \frac{x^a}{1+x^3},$$

i obliczyć ją metodą residuów wykorzystując kontur “dziurka od klucza” (rysunek 8).

Rozwiązanie: Dla $x \rightarrow 0$ oraz $x \rightarrow \infty$ całka zachowuje się odpowiednio jak

$$\sim \int_0 dx x^a, \quad \text{oraz} \quad \sim \int^\infty dx x^{a-3}.$$

Całka jest zatem zbieżna, jeśli, co też i dalej zakładamy, $-1 < a < 2$.

Korzystając z konturu Γ “dziurka od klucza” przyjmujemy omówioną wyżej definicję funkcji z^a na płaszczyźnie z rozcięciem biegnącym od $z = 0$ wzdłuż dodatniej półosi rzeczywistej do $z = \infty$, przy czym fazę wybieramy tak, by $(x + i0)^a = x^a$, gdy $x > 0$. Mamy wtedy

$$\oint_\Gamma dz f(z) \equiv \int_{K_\varepsilon^-} dz f(z) + \int_\varepsilon^R dx \frac{x^a}{1+x^3} + \int_{K_R} dz f(z) + \int_R^\varepsilon dx \frac{(x e^{2\pi i})^a}{1+x^3} = \sum_{i=0,+,-} \text{res } f(z)|_{z=z_i},$$

gdzie z_0 , z_+ i z_- są trzema pierwiastkami równania $z^3 + 1 = 0$:

$$z_0 = -1 = e^{i\pi}, \quad z_+ = \frac{1}{2}(1 + i\sqrt{3}) = e^{i\frac{\pi}{3}}, \quad z_- = \frac{1}{2}(1 - i\sqrt{3}) = e^{i\frac{5\pi}{3}}.$$

Druga postać każdego z tych pierwiastków jest zgodna z przyjętą definicją funkcji $f(z)$ na płaszczyźnie z rozcięciem (i to ona musi być użyta wszędzie, gdzie z_i jest podnoszony do niecałkowitej potęgi).

Szacujemy następnie w standardowy sposób całki po okręgach

$$\left| \int_{K_\varepsilon^-} dz f(z) \right| \leq \int_0^{2\pi} d\varphi \varepsilon \frac{\varepsilon^a}{1-\varepsilon^3} \rightarrow 0,$$

bo $a > -1$;

$$\left| \int_{K_R} dz f(z) \right| \leq \int_0^{2\pi} d\varphi R \frac{R^a}{R^3-1} = 2\pi \frac{R^{a+1}}{R^3-1} \rightarrow 0,$$

jako, że $a < 2$. W podwójnej granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ mamy zatem równość:

$$(1 - e^{2\pi ia}) \int_0^\infty dx \frac{x^a}{1+x^3} = \sum_{i=0,+,-} \text{res } f(z)|_{z=z_i}.$$

Residua znajdujemy wykorzystując rozkład $z^3 + 1 = (z + 1)(z^2 - z + 1)$, oraz to, że $z_+ - z_- = i\sqrt{3}$:

$$\begin{aligned}\operatorname{res} f(z)|_{z=-1} &= \frac{1}{3} e^{i\pi a}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=z_+} &= \frac{e^{i\frac{\pi}{3}a}}{i\sqrt{3}(z_+ + 1)} = -\frac{1}{3} \frac{e^{i\frac{\pi}{3}a}}{z_-} = -\frac{1}{3} e^{i\frac{\pi}{3}a} e^{i\frac{\pi}{3}}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=z_-} &= \frac{e^{i\frac{5\pi}{3}a}}{-i\sqrt{3}(z_- + 1)} = -\frac{1}{3} \frac{e^{i\frac{5\pi}{3}a}}{z_+} = -\frac{1}{3} e^{i\frac{5\pi}{3}a} e^{-i\frac{\pi}{3}}.\end{aligned}$$

Stąd

$$\begin{aligned}\int_0^\infty dx \frac{x^a}{1+x^3} &= \frac{2\pi i}{3(1-e^{2\pi i a})} \left(e^{i\pi a} - e^{i\frac{\pi}{3}a} e^{i\frac{\pi}{3}} - e^{i\frac{5\pi}{3}a} e^{-i\frac{\pi}{3}} \right) \\ &= \frac{2\pi i}{3(e^{-i\pi a} - e^{i\pi a})} \left(1 - e^{-i\frac{2\pi}{3}a} e^{i\frac{\pi}{3}} - e^{i\frac{2\pi}{3}a} e^{-i\frac{\pi}{3}} \right),\end{aligned}$$

czyli, po zapisaniu wyniku przez funkcje trygonometryczne,

$$\int_0^\infty dx \frac{x^a}{1+x^3} = \frac{\pi}{3 \sin(\pi a)} \left\{ 2 \cos \left[\frac{\pi}{3}(2a-1) \right] - 1 \right\}.$$

Aby z tej postaci znaleźć wartość całki dla $a = 0$, trzeba obliczać granicę $a \rightarrow 0$ (wynik: $2\pi/3\sqrt{3}$). Trochę sztuczek trygonometrycznych pozwala wynik przepisać w postaci (takiej w jakiej daje go program *Mathematica*)

$$\int_0^\infty dx \frac{x^a}{1+x^3} = \frac{\pi}{3 \sin \left[\frac{1}{3}\pi(1+a) \right]},$$

która od razu daje skończony wynik dla $-1 < a < 2$.

Zadanie

Podać warunki zbieżności całki niewłaściwej

$$\int_0^\infty dx \frac{x^a}{(1+x^2)^2},$$

i obliczyć ją metodą residuów wykorzystując kontur “dziurka od klucza” (rysunek 8).

Rozwiązanie: Całka jest zbieżna, jeśli $-1 < a < 3$. Całkując po konturze dziurka od klucza mamy

$$\begin{aligned}\oint dz f(z) &= \int_0^\infty dx \frac{x^a}{(1+x^2)^2} + e^{2\pi i a} \int_\infty^0 dx \frac{x^a}{(1+x^2)^2} \\ &\quad + \int_{K_\varepsilon} dz f(z) = 2\pi i \left(\operatorname{res} f(z)|_{z=i} + \operatorname{res} f(z)|_{z=-i} \right),\end{aligned}$$

przy czym i oraz $-i$ należy, zgodnie z definicją funkcji z^a na płaszczyźnie z rozcięciem zapisać odpowiednio w postaci $e^{i\frac{\pi}{2}}$ oraz $e^{i\frac{3\pi}{2}}$.

Znajdujemy residua (bieguny są drugiego rzędu). Pochodna:

$$\frac{d}{dz} \frac{z^a}{(z \pm i)^2} = \frac{a z^a}{z(z \pm i)^2} - \frac{2z^a}{(z \pm i)^3}.$$

i residua:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i} &= \left(\frac{a}{i(2i)^2} - \frac{2}{(2i)^3} \right) e^{i\frac{\pi}{2}a} = \frac{i}{4} (a-1) e^{i\frac{\pi}{2}a}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=-i} &= \left(\frac{a}{-i(-2i)^2} - \frac{2}{(-2i)^3} \right) e^{i\frac{3\pi}{2}a} = \frac{-i}{4} (a-1) e^{i\frac{3\pi}{2}a}, \end{aligned}$$

Pokazujemy następnie standardowo, że w granicy $R \rightarrow \infty$ całka po dużym okręgu zachowuje się jak $R^{a+1}/R^4 = R^{a-3}$, a w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ całka po małym - jak ε^{a+1} ; obie całki znikają zatem dla takich a , dla których wyjściowa całka jest zbieżna.

W podwójnej granicy $R \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$, po uporządkowaniu granic drugiej całki, otrzymujemy zatem związek

$$(1 - e^{2\pi ai}) \int_0^\infty dx \frac{x^2}{(1+x^2)^2} = \frac{\pi}{2} (a-1) \left(e^{i\frac{3\pi}{2}} - e^{i\frac{\pi}{2}} \right),$$

który daje:

$$\int_0^\infty dx \frac{x^a}{(1+x^2)^2} = \frac{\pi}{2} (a-1) \frac{e^{i\pi a} (e^{i\frac{\pi}{2}a} - e^{-i\frac{\pi}{2}a})}{-e^{i\pi a} (e^{i\pi a} - e^{-i\pi a})} = \frac{\pi}{2} (a-1) \frac{\sin(\pi a/2)}{-\sin(\pi a)} = \frac{\pi(1-a)}{4 \cos(\pi a/2)}.$$

Wynik ten, jak prawilo, potwierdza program *Mathematica*.

Zadanie

Podać warunki zbieżności całki niewłaściwej

$$\int_0^\infty dz \frac{x^p}{x^2 - 2x \cos \lambda + 1},$$

i obliczyć ją metodą residuów wykorzystując kontur “dziurka od klucza” (rysunek 8).

Rozwiązanie: Całka jest zbieżna dla $-1 < p < 1$. Całkujemy po “dziurce od klucza” funkcję

$$f(z) = \frac{z^p}{z^2 - 2z \cos \lambda + 1} = \frac{z^p}{(z - e^{i\lambda})(z - e^{i(2\pi-\lambda)})}.$$

Ponieważ zgodnie z definicją funkcji z^p na płaszczyźnie z rozcięciem, takim jak na rysunku 8, argument każdej liczby zespolonej musi należeć do przedziału $(0, 2\pi)$, przeto drugi pierwiastek równania kwadratowego $z^2 - 2z \cos \lambda + 1 = 0$ musi zostać zapisany w postaci $e^{i(2\pi-\lambda)}$.

W granicy $R \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$ znikają jak zwykle całki po okręgach. Wewnątrz konturu funkcja ma dwa bieguny proste; suma residuów funkcji w tych punktach wynosi

$$\begin{aligned}\sum \operatorname{res} f(z) &= \frac{e^{i\lambda p}}{e^{i\lambda} - e^{i(2\pi-\lambda)}} + \frac{e^{i(2\pi-\lambda)p}}{e^{i(2\pi-\lambda)} - e^{i\lambda}} \\ &= \frac{1}{e^{i\lambda} - e^{i(2\pi-\lambda)}} (e^{ip\lambda} - e^{i(2\pi-\lambda)p}).\end{aligned}$$

Z twierdzenia o residuach, w granicy $R \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$ otrzymujemy zatem związek

$$(1 - e^{2\pi pi}) \int_0^\infty dx \frac{x^p}{x^2 - 2x \cos \lambda + 1} = \frac{2\pi i}{e^{i\lambda} - e^{i(2\pi-\lambda)}} (e^{ip\lambda} - e^{i(2\pi-\lambda)p}),$$

czyli

$$\int_0^\infty dx \frac{x^p}{x^2 - 2x \cos \lambda + 1} = \frac{2\pi i}{e^{i\lambda} - e^{i(2\pi-\lambda)}} \frac{e^{ip\pi} (e^{ip(\lambda-\pi)} - e^{-ip(\lambda-\pi)})}{e^{ip\pi} (e^{-ip\pi} - e^{ip\pi})} = \frac{\pi}{\sin \lambda} \frac{\sin[p(\pi - \lambda)]}{\sin(p\pi)},$$

co można zapisać w postaci

$$\int_0^\infty dx \frac{x^p}{x^2 - 2x \cos \lambda + 1} = \frac{\pi}{\sin \lambda} [\cos(p\lambda) - \operatorname{ctg}(p\pi) \sin(p\lambda)].$$

Przypomnienie

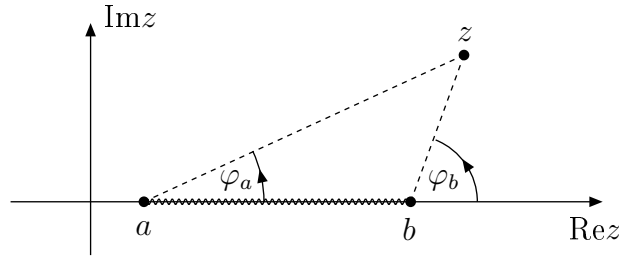
Funkcja¹¹

$$h(z) = \left(\frac{z - a}{b - z} \right)^\alpha,$$

ma dla $\alpha \notin \mathbb{Z}$ dwa punkty rozgałęzienia w $z = a$ oraz $z = b$. Teraz jednak można $h(z)$ (niezależnie od tego, czy wykładnik α jest liczbą wymierną, czy nie) zdefiniować jako funkcję jednoznaczna na płaszczyźnie zespolonej zmiennej z mającej *jedno rozcięcie łączące punkty* $z = a$ i $z = b$. (Oczywiście można by też zrobić dwa cięcia jedno od $z = a$ do $z = \infty$ i drugie od $z = b$ do $z = \infty$; było by to jednak niewykorzystanie wszystkich możliwości i nie byłoby użyteczne w przykładzie rozpatrywanym poniżej). Istotnie, jeśli $h(z)$ zdefiniujemy wzorem

$$h(z) = \left| \frac{z - a}{b - z} \right|^\alpha e^{i\alpha(\varphi_a - \varphi_b)} e^{i\pi\beta},$$

w którym fazy φ_a i φ_b są zdefiniowane na rysunku 12 (faza β jest na razie dowolna; ustalimy ją za chwilę), to po obiegnięciu przez zmienną z naokoło całego rozcięcia zarówno faza φ_a , jak i faza φ_b zmieniają się o 2π , ale ich różnica nie ulegnie zmianie i wartość funkcji $h(z)$ zdefiniowana powyższym wzorem będzie taka jak przed obiegami. (Nie było by tak,



Rysunek 12: Sposób zdefiniowania funkcji $h(z) = [(z-a)/(b-z)]^\alpha$ na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z mającej cięcie od $z=a$ do $z=b$.

gdyby zmienna z obiegała np. punkt $z=a$ przechodząc przez rozcięcie: faza φ_a zmieniałaby się wtedy o 2π , ale faza φ_b - nie).

Fazę β można wybrać dowolnie. Ponieważ dobrze by było, by wartości funkcji $h(z)$ pokrywały się z wartościami rzeczywistej funkcji $H : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}_+$

$$H(x) = \left(\frac{x-a}{b-x} \right)^\alpha,$$

dla rzeczywistych zmiennych z należących do przedziału (a, b) , przeto definiujemy¹²

$$h(z) = \left| \frac{z-a}{b-z} \right|^\alpha e^{i\alpha(\varphi_a - \varphi_b)} e^{i\pi\alpha}.$$

Jak łatwo sprawdzić, dla $z = x + i0$ (jak już było powiedziane, zapis ten należy rozumieć jako $z = x + i\delta$, gdzie $\delta \rightarrow 0^+$) takich, że $a < x < b$, wartości tak zdefiniowanej funkcji $h(z)$ są rzeczywiste i dodatnie. Istotnie: mamy wtedy $\varphi_a = 0$ oraz $\varphi_b = \pi$ i całkowita faza jest równa zero.

Zadanie

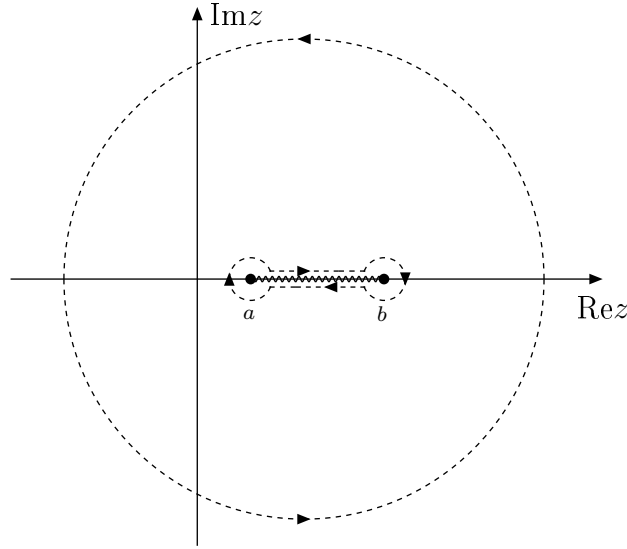
Obliczyć całkę

$$\int_0^1 \frac{dx}{(x+1)[x^2(1-x)]^{1/3}}.$$

Rozwiązanie: Całka jest zbieżna: wprawdzie punkty graniczne są punktami osobliwymi funkcji podcałkowej, niemniej osobliwości te są całkwalne (zgodnie ze zwykłymi kryteriami skończoności całek niewłaściwych). W celu obliczenia powyższej całki całkujemy

¹¹W zasadzie wszystko, co mówimy poniżej pozostaje słuszne dla $a, b \in \mathbb{C}$. Ponieważ jednak interesować nas będą całki z funkcji rzeczywistych, więc ograniczymy się do przypadku rzeczywistych a i b . Przyjmijmy także dalej, że $a < b$.

¹²W istocie zdefiniowana na rysunku 12 faza φ_b jest fazą liczby $z-b$, a nie $b-z$; faza tej drugiej różni się od φ_b o $\pm\pi$ i to jest powodem, dla którego przy narzuconym na funkcję $h(z)$ warunku konieczne jest uwzględnienie w jej definicji dodatkowego czynnika $e^{i\pi\alpha}$.



Rysunek 13: Kontur całkowania Γ zwany “kością na talerzu”.

po konturze Γ typu “kość na talerzu” (o $a = 0$ i $b = 1$) pokazanym na rysunku 13 funkcję

$$f(z) = \frac{1}{z(z+1)} \left(\frac{z}{1-z} \right)^{1/3},$$

przy czym niebędący funkcją jednoznaczną na całej płaszczyźnie drugi czynnik definiujemy w sposób omówiony powyżej na płaszczyźnie z rozcięciem biegnącym po osi rzeczywistej od $z = 0$ do $z = 1$. Dla $z = x + i0$, gdzie $0 < x < 1$ (tj. na górnym poziomym fragmencie “kości”) mamy wtedy zgodnie z przyjętym przepisem

$$f(x + i0) \equiv \lim_{\delta \rightarrow 0^+} f(x + i\delta) = \frac{1}{x(x+1)} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{1/3},$$

a dla $z = x - i0$, gdzie $0 < x < 1$ (tj. na dolnym poziomym fragmencie “kości”)

$$f(x - i0) \equiv \lim_{\delta \rightarrow 0^+} f(x - i\delta) = \frac{1}{x(x+1)} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{1/3} e^{\frac{2}{3}\pi i},$$

jako że aby się tam dostać od $z = x + i0$ musimy okrążyć np. punkt $z = 0$ od lewej strony, a wtedy faza φ_a (patrz rys. 12) wzrasta od 0 do 2π (faza φ_b pozostaje przy tym równa π). Moglibyśmy też zamiast tego okrążyć punkt $z = 1$ od prawej strony: wtedy faza φ_a nie zmieniłaby się, za to faza φ_b zmalałaby o 2π i wynik byłby taki sam.

Możemy zatem napisać

$$\oint_{\Gamma} dz f(z) = \int_{\varepsilon}^{1-\varepsilon} dx f(x) + e^{\frac{2}{3}\pi i} \int_{1-\varepsilon}^{\varepsilon} dx f(x)$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{K_\varepsilon^-(0)} dz f(z) + \int_{K_\varepsilon^-(1)} dz f(z) + \int_{K_R} dz f(z) \\
& = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=-1} .
\end{aligned}$$

Uwzględniliśmy tu to, że w obszarze zawartym wewnątrz konturu, tj. pomiędzy “kością” właściwą¹³ a brzegiem “talerza” (dużym okręgiem), funkcja $f(z)$ ma tylko jeden biegun w $z = -1$. Interesuje nas oczywiście granica $\varepsilon \rightarrow 0$ ($K_\varepsilon^-(0)$ oraz $K_\varepsilon^-(1)$ oznaczają okręgi o promieniu ε i środkach odpowiednio w $z = 0$ oraz $z = 1$; minus u góry oznacza, że są one obieganym zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara), w której całki po prostych fragmentach kości stają się całką, którą chcemy obliczyć.

Oszacujmy zatem całkę po epsilonowym okręgu wokół $z = 0$. Na tym okręgu $z = \varepsilon e^{i\varphi}$. Mamy

$$\begin{aligned}
\left| \int_{K_\varepsilon^-(0)} dz f(z) \right| & \leq \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi \varepsilon}{|(1 + \varepsilon e^{i\varphi})[\varepsilon^2 e^{2i\varphi}(1 - \varepsilon e^{i\varphi})]^{1/3}|} \\
& \leq \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi \varepsilon}{(1 - \varepsilon)[\varepsilon(1 - \varepsilon)]^{1/3}} = 2\pi \frac{\varepsilon^{1/3}}{(1 - \varepsilon)^{4/3}} .
\end{aligned}$$

Podobnie szacuje się całkę po $K_\varepsilon^-(1)$. Zatem w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ całki te znikają.

Pozostaje zatem rozpatrzyć całkę po brzegu “talerza”, tj. okręgu o promieniu R . Tu sprawa jest prosta bo na okręgu o promieniu R , na którym $z = R e^{i\varphi}$ całka ta zachowuje się jak

$$\int_{K_R} dz f(z) \sim \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi R}{R^2} \sim \frac{1}{R} ,$$

i znika w granicy $R \rightarrow \infty$. W następnych przykładach podobne całki nie będą już znikać i do ich efektywnego obliczania przydatny będzie koncept *residuum w nieskończoności*.

W granicy $R \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$ i po odwróceniu granic drugiej z całek otrzymujemy więc związek:

$$\left(1 - e^{\frac{2}{3}\pi i}\right) \int_0^1 dx f(x) = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=-1} .$$

W $z = -1$ funkcja $f(z)$ ma biegun prosty i residuum jest dane przez

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=-1} = \lim_{z \rightarrow -1} \frac{1}{z} \left(\frac{z}{1-z} \right)^{1/3} = \frac{1}{-1} \left| \frac{-1}{2} \right|^{1/3} e^{\frac{i}{3}(\pi-\pi)} e^{\frac{i}{3}\pi} = -\frac{e^{\frac{i}{3}\pi}}{2^{1/3}}$$

(w punkcie $z = -1$ leżącym na rysunku 12 na osi rzeczywistej na lewo od punktu $a = 0$ obie fazy φ_a oraz φ_b są równe π).

¹³Jak w dowcipie: “Z czego się składa pies ogólnowojskowy? Z żołnierza prowadzącego, smyczy przewodzącej i psa właściwego”.

Stąd ostatecznie (wynik sprawdzony programem *Mathematica*)

$$\begin{aligned}\int_0^1 \frac{dx}{(x+1)[x^2(1-x)]^{1/3}} &= -\frac{2\pi i}{2^{1/3}} \frac{e^{\frac{i}{3}\pi}}{1 - e^{\frac{2}{3}\pi i}} = \frac{-2\pi i}{2^{1/3}(e^{-\frac{i}{3}\pi} - e^{\frac{i}{3}\pi})} \\ &= \frac{\pi}{2^{1/3} \sin(\pi/3)} = \frac{2^{2/3} \pi}{\sqrt{3}}.\end{aligned}$$

Zadanie

Wykorzystując kontur “kość (na talerzu)” obliczyć całkę

$$I = \int_{-1}^1 \frac{dx}{(ax+b)[(1-x)(1-x^2)]^{1/3}}.$$

Rozpatrzyć przypadki $|b/a| > 1$ oraz $|b/a| < 1$.

Rozwiązanie: Jeśli $|b/a| > 1$, całka jest zbieżna zgodnie ze zwykłymi kryteriami zbieżności całek niewłaściwych. Aby ją obliczyć całkujemy funkcję

$$f(z) = \frac{1}{(az+b)(1-z)} \left(\frac{z+1}{1-z} \right)^{-1/3} \equiv \frac{1}{(az+b)(1-z)} \left| \frac{z+1}{1-z} \right|^{-1/3} e^{-\frac{i}{3}(\varphi_a - \varphi_b + \pi)},$$

po konturze “kość na talerzu” pokazanym na rysunku 13. Wewnątrz konturu (tj. pomiędzy kością właściwą, a brzegiem talerza) funkcja $f(z)$ ma jeden biegun prosty w punkcie $z = -b/a$. Jej residuum w tym punkcie jest równe

$$\text{res } f(z)|_{z=-b/a} = \frac{1}{a+b} \left| \frac{a-b}{a+b} \right|^{-1/3} e^{-i\frac{\pi}{3}},$$

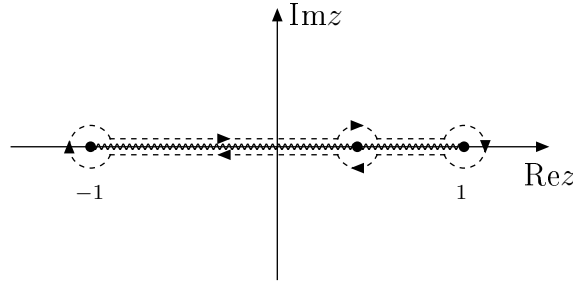
gdyż albo $\varphi_a = \varphi_b = 0$ (gdy $-b/a > 0$), albo $\varphi_a = \varphi_b = \pi$ (gdy $-b/a < 0$).

Nietrudno sprawdzić, tak jak w poprzednim zadaniu, że w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ znikają obie całki po okręgach (o promieniach ε okrążające punkty $z = \mp 1$, a w granicy $R \rightarrow \infty$ znika całka po dużym okręgu (o promieniu R - “brzeg talerza”). W tej podwójnej granicy mamy zatem związek

$$\oint_{\Gamma} dz f(z) = \int_{-1}^1 dx f(x) + \int_1^{-1} dx f(x-i0) = \frac{2\pi i}{a+b} \left| \frac{a-b}{a+b} \right|^{-1/3} e^{-i\frac{\pi}{3}},$$

lub, po uwzględnieniu, że zgodnie z regułą przedłużania funkcji na dolny brzeg “kości” $f(x-i0) = e^{-i\frac{2\pi}{3}} f(x)$ (na dolnym brzegu $\varphi_a = 2\pi$, $\varphi_b = \pi$) i odwróceniu granic drugiej całki,

$$\left(1 - e^{-i\frac{2\pi}{3}}\right) \int_{-1}^1 dx f(x) = \frac{2\pi i}{a+b} \left| \frac{a-b}{a+b} \right|^{-1/3} e^{-i\frac{\pi}{3}}.$$



Rysunek 14: Kontur całkowania Γ omijający biegun położony na rozcięciu.

Zatem gdy $|b/a| > 1$

$$\int_{-1}^1 \frac{dx}{(ax+b)[(1-x)(1-x^2)]^{1/3}} = \frac{\pi}{(a+b)\sin(\pi/3)} \left| \frac{a+b}{a-b} \right|^{1/3} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}(a+b)} \left| \frac{a+b}{a-b} \right|^{1/3}.$$

Gdy $|b/a| < 1$ całka istnieje w sensie wartości głównej (punkt osobliwy leży w przedziale całkowania). Aby ją obliczyć w tym sensie, całkujemy funkcję $f(z)$ po konturze Γ' “kość z gulką na talerzu”, tj. po konturze podobnym do tego z rysunku 13, ale z “kością właściwą” zastąpioną konturem z rysunku 14. Wewnątrz konturu, tj. w obszarze pomiędzy “kością z gulką”, a “brzegiem talerza” funkcja jest holomorficzna. Zatem

$$\oint_{\Gamma'} dz f(z) = 0.$$

Całki po okręgach okrążające punkty $z = \mp 1$ oraz całka po “brzegu talerza” znikają, tak jak poprzednio, w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$. Trzeba teraz jednak uwzględnić także całki po “gulce” tj. po małych półokręgach (o promieniu ε) okrążających punkt $z_0 = -b/a$. Na górnym półokręgu $z = -b/a + \varepsilon e^{i\varphi}$ i

$$\int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^{-}(z_0)}^{\text{góra}} dz f(z) \rightarrow \int_{\pi}^0 d\varphi \frac{i}{a+b} \left| \frac{a-b}{a+b} \right|^{-1/3} = \frac{-i\pi}{a+b} \left| \frac{a+b}{a-b} \right|^{1/3}$$

(jako że dla z na górnym brzegu kości $\varphi_a = 0$, $\varphi_b = \pi$). Na dolnym zaś

$$\int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^{-}(z_0)}^{\text{dół}} dz f(z) \rightarrow \int_{\pi}^0 d\varphi \frac{i}{a+b} \left| \frac{a-b}{a+b} \right|^{-1/3} = \frac{-i\pi}{a+b} \left| \frac{a+b}{a-b} \right|^{1/3} e^{-i\frac{2\pi}{3}},$$

gdyż tam $\varphi_a = 2\pi$, $\varphi_b = \pi$. Gdy $|b/a| < 1$ całka daje zatem

$$\int_{-1}^1 \frac{dx}{(ax+b)[(1-x)(1-x^2)]^{1/3}} = -\frac{\pi \operatorname{ctg}(\pi/3)}{(a+b)} \left| \frac{a+b}{a-b} \right|^{1/3} = -\frac{\pi}{\sqrt{3}(a+b)} \left| \frac{a+b}{a-b} \right|^{1/3}.$$

Przypomnienie:

Jeśli funkcja $f(z)$ jest holomorficzna w otoczeniu pierścieniowym $r < |z| < \infty$, to funkcja

$$g(z) \equiv f(1/z),$$

jest holomorficzna w otoczeniu pierścieniowym $0 < |z| < 1/r$ punktu $z = 0$. Obszar $r < |z| < \infty$ nazywamy otoczeniem pierścieniowym punktu $z = \infty$. W otoczeniu tym funkcja może być przedstawiona w postaci szeregu Wawrzusia

$$f(z) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n z^n + a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{-n}}{z^n},$$

stanowiącym jednocześnie rozwinięcie funkcji $f(z)$ w otoczeniu punktu $z = \infty$. Jeśli punkt $z = 0$ jest dla funkcji $g(z) \equiv f(1/z)$ punktem regularnym (tj. funkcja $g(z)$ nie jest w tym punkcie osobliwa), to mówimy, że punkt $z = \infty$ jest też punktem regularnym funkcji $f(z)$. Jeśli $g(z)$ ma w $z = 0$ biegun rzędu k , to mówimy, że funkcja $f(z)$ ma w $z = \infty$ również biegun rzędu k , jeśli zaś $g(z)$ ma w $z = 0$ punkt istotnie osobliwy, to funkcja $f(z)$ ma takowy w $z = \infty$. Wynika stąd, że gdy funkcja $f(z)$ jest w $z = \infty$ regularna, to w podanym wyżej szeregu znikają wszystkie wyrazy a_n o $n \geq 1$. Gdy niezerowa jest tylko skończona liczba wyrazów z dodatnimi potęgami z , to funkcja $f(z)$ ma w $z = \infty$ biegun skończonego rzędu: biegun jest rzędu k , gdy

$$f(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{-n}}{z^n} + a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_k z^k.$$

Residuum funkcji $f(z)$ w punkcie $z = \infty$ nazywa się wzięty z minusem współczynnik a_{-1} rozwinięcia $f(z)$ w szereg Wawrzusia wokół $z = \infty$. Zauważmy od razu, że funkcja $f(z)$ może być w $z = \infty$ regularna w sensie podanej wyżej definicji, a mimo to mieć w $z = \infty$ niezerowe residuum; w przypadku punktów $z \neq \infty$ regularność funkcji w takim punkcie pociągała za sobą znikanie residuum. Współczynnik a_{-1} rozwinięcia $f(z)$ w otoczeniu $z = \infty$ jest zarazem proporcjonalny do wartości całki z $f(z)$ po obiegającym jednokrotnie punkt $z = 0$ zamkniętym konturze leżącym całkowicie w otoczeniu pierścieniowym punktu $z = \infty$, tj. po konturze, na którym $|z| > r$ (w granicy kontur może być uważany za nieskończenie duży i obiegający jednokrotnie punkt $z = \infty$; branie tej granicy nie jest jednak konieczne):

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} \equiv -a_{-1} = -\frac{1}{2\pi i} \oint dz f(z).$$

Związek ten wynika jak zwykle z bezpośredniego scałkowania $f(z)$ po okręgu o dowolnym promieniu $R > r$ i środku w $z = 0$. Istotnie:

$$\int_{K_R(0)} dz f(z) = \int_0^{2\pi} d\varphi i R e^{i\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n R^n e^{in\varphi} = 2\pi i a_{-1}.$$

Głównym zastosowaniem pojęcia residuum $f(z)$ w $z = \infty$ jest właśnie obliczanie całek po zamkniętych konturach oddalonych odpowiednio daleko od $z = 0$. Powodem, dla którego residuum w nieskończoności jest zdefiniowane ze znakiem minus jest (jak zobaczymy) nieredukowalne (i w zasadzie chwalebne!) dążenie matematyków do elegancji.

Jeśli funkcja $f(z)$ ma w $z = \infty$ biegun rzędu k (co naogół najłatwiej ustalić badając funkcję $g(z) \equiv f(1/z)$ w punkcie $z = 0$), jej residuum jest dane łatwym do zrozumienia wzorem

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = \frac{(-1)^k}{(k+1)!} \lim_{z \rightarrow \infty} \left(z^{k+2} \frac{d^{k+1} f(z)}{dz^{k+1}} \right).$$

Przykłady

Jako pierwszy przykład sprawdzmy funkcję z poprzedniego zadania:

$$f(z) = \frac{1}{z(z+1)} \left(\frac{z}{1-z} \right)^{1/3}.$$

Bezpośrednio dla $|z| \rightarrow \infty$ możemy napisać:

$$f(z) = \frac{1}{z^2(1+1/z)} \left(\frac{-1}{1-1/z} \right)^{1/3}.$$

Rozwijając czynniki $1 \pm 1/z$ w szeregi potęgowe widzimy od razu, że

$$f(z) = \frac{(-1)^{1/3}}{z^2} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{z^3}\right),$$

czyli że $a_{-1} = 0$. Ten sam wniosek można uzyskać konstruując funkcję

$$g(z) \equiv f(1/z) = \frac{z^2}{1+z} \left(\frac{1}{z-1} \right)^{1/3}.$$

Punkt $z = 0$ jest jej punktem regularnym, a zatem $z = \infty$ jest punktem regularnym funkcji $f(z)$.

Drugim przykładem jest funkcja

$$f(z) = \frac{\cos(1/z)}{z^2 + 1}.$$

Ponieważ funkcja

$$g(z) \equiv f(1/z) = \frac{z^2 \cos z}{z^2 + 1},$$

może być rozwinięta w zwykły szereg Taylora wokół $z = 0$

$$g(z) = z^2(1 - z^2 + z^4 + \dots) \left(1 - \frac{1}{2}z^2 + \dots \right),$$

więc sama funkcja $f(z)$ jest regularna w punkcie $z = \infty$ i ma zerowe residuum w tym punkcie (bo współczynnik przy z rozwinięcia $g(z)$ wokół $z = 0$ jest równy zero).

Zadanie

Obliczyć całkę

$$I = \int_a^b \frac{dx}{\sqrt{(x-a)(b-x)}}.$$

Rozwiązanie: Całka jest zbieżna zgodnie ze zwykłymi kryteriami zbieżności całek niewłaściwych. Aby ją obliczyć całkujemy funkcję

$$f(z) = \frac{1}{z-a} \sqrt{\frac{z-a}{b-z}} \equiv \frac{1}{z-a} \left| \frac{z-a}{b-z} \right|^{1/2} e^{\frac{i}{2}(\varphi_a - \varphi_b + \pi)},$$

po konturze “kość na talerzu” pokazanym na rysunku 13. Wewnątrz konturu (tj. pomiędzy kością właściwą, a brzegiem talerza) funkcja $f(z)$ jest holomorficzna.

W punkcie $z = \infty$ funkcja $f(z)$ jest regularna, bo funkcja

$$g(z) \equiv f(1/z) = \frac{z}{\sqrt{(1-az)(bz-1)}},$$

ma w $z = 0$ zero pierwszego rzędu, ale $f(z)$ ma w $z = \infty$ nieznikające residuum $-a_{-1}$:

$$\begin{aligned} -a_{-1} &\equiv \operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = -\lim_{z \rightarrow \infty} (zf(z)) \\ &= -\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{z}{z-a} \left| \frac{z-a}{b-z} \right|^{1/2} e^{\frac{i}{2}(\varphi_a - \varphi_b + \pi)} = -e^{i\frac{\pi}{2}} = -i, \end{aligned}$$

gdyż w granicy $z \rightarrow \infty$ (obojętne, w którym kierunku) obie fazy φ_a i φ_b zdefiniowane na rysunku 12 stają się równe.

Tak jak w poprzednich przykładach można łatwo pokazać, że całki po małych okręgach (o promieniach ε) obiegających punkty $z = a$ i $z = b$ znikają w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$.

W granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ mamy zatem z twierdzenia o residuach równość

$$\oint_{\Gamma} dz f(z) = \int_a^b dx f(x) + \int_b^a dx f(x-i0) + \int_{K_R} dz f(z) = 0,$$

lub, po uwzględnieniu, że zgodnie z regułą przedłużania funkcji na dolny brzeg “kości” $f(x-i0) = -f(x)$ oraz wykorzystując koncept residuum w nieskończoności

$$2 \int_a^b \frac{dx}{\sqrt{(x-a)(b-x)}} = 2\pi i a_{-1} = 2\pi.$$

Zadanie

Obliczyć całkę

$$\int_0^3 dx f(x) = \int_0^3 dx \frac{[x^3(3-x)]^{1/4}}{5-x}.$$

Rozwiązanie: Rozszerzoną na zbiór liczb zespolonych funkcję podcałkową zapisujemy w postaci

$$f(z) = \frac{3-z}{5-z} \left(\frac{z}{3-z} \right)^{3/4} \equiv \frac{z-3}{z-5} \left| \frac{z}{3-z} \right|^{3/4} e^{i\frac{3}{4}(\varphi_a - \varphi_b + \pi)}$$

i całkujemy po konturze “kość na talerzu” (rysunek 13). Dla $z = x + i0$ mamy wtedy zgodnie z przepisem $f(z = x + i0) = f(x)$, na dolnym zaś prostym odcinku kości

$$f(x - i0) = e^{\frac{3}{2}\pi i} f(x),$$

gdyż tam $\varphi_a = 2\pi$, a $\varphi_b = \pi$. Mamy więc (całki po małych okręgach wokół punktów $a = 0$ i $b = 3$ znikają, tak jak w poprzednim przykładzie):

$$\oint_{\Gamma} dz f(z) = \int_0^3 dx f(x) + e^{\frac{3}{2}\pi i} \int_3^0 dx f(x) + \int_{K_R} dz f(z) = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=5}.$$

Residuum w punkcie $z = 5$ łatwo znaleźć (funkcja ma tam biegun prosty):

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=5} = \lim_{z \rightarrow 5} \left[(z-3) \left| \frac{z}{3-z} \right|^{3/4} e^{i\frac{3}{4}(0-0+\pi)} \right] = 2 \left(\frac{5}{2} \right)^{3/4} e^{i\frac{3}{4}\pi}.$$

gdyż w tym punkcie $\varphi_a = \varphi_b = 0$.

Następnie musimy obliczyć całkę po dużym okręgu o promieniu $R > 5$ (nie musimy brać $R \rightarrow \infty$; wystarczy taki promień R , by funkcja $f(z)$ była holomorficzną w pierścieniu $R < |z| < \infty$). Całkę tę obliczamy wykorzystując residuum $f(z)$ w $z = \infty$. Zapisując $f(z)$ w postaci

$$f(z) = \frac{1-3/z}{1-5/z} \left(\frac{-1}{1-3/z} \right)^{3/4},$$

widzimy, iż jej rozwinięcie w szereg Wawrzusia dla $R < |z| < \infty$ będzie miało postać

$$f(z) = \dots + \frac{a_{-1}}{z} + a_0,$$

tj. w $z = \infty$ funkcja $f(z)$ ma biegun rzędu 0. Możemy więc skorzystać z podanego wyżej wzoru

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = \frac{(-1)^0}{1!} \lim_{z \rightarrow \infty} z^2 \frac{df}{dz}.$$

$$\begin{aligned}
f'(z) &= \left(\frac{z}{3-z}\right)^{3/4} \left[\frac{1}{z-5} - \frac{z-3}{(z-5)^2} \right] + \frac{3}{4} \left(\frac{z}{3-z}\right)^{-1/4} \left[\frac{1}{3-z} + \frac{z}{(3-z)^2} \right] \frac{z-3}{z-5} \\
&= \left(\frac{z}{3-z}\right)^{3/4} \left\{ \frac{-2}{(z-5)^2} + \frac{3}{4} \frac{3}{z(3-z)} \frac{z-3}{z-5} \right\}.
\end{aligned}$$

Znajdujemy więc, że

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = \lim_{z \rightarrow \infty} z^2 f'(z) = e^{i\frac{3}{4}\pi} \left(-2 - \frac{9}{4}\right) = -\frac{17}{4} e^{i\frac{3}{4}\pi}.$$

Czynnik fazowy wynosi $e^{i\frac{3}{4}\pi}$, gdyż dla $z \rightarrow \infty$, obojętne, w którym kierunku, $\varphi_a - \varphi_b \rightarrow 0$ (obie linie łączące punkty $z = a$ i $z = b$ z punktem $z \rightarrow \infty$ stają się w granicy nawzajem do siebie równoległe).

Mamy więc

$$\begin{aligned}
\left(1 - e^{\frac{3}{2}\pi i}\right) \int_0^3 dx f(x) &= - \int_{K_R} dz f(z) + 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=5} \\
&= 2\pi i (\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} + \operatorname{res} f(z)|_{z=5}).
\end{aligned}$$

A zatem (co potwierdza program *Mathematica*)

$$\begin{aligned}
\int_0^3 dx f(x) &= \frac{2\pi i}{1 - e^{\frac{3}{2}\pi i}} \left(2 \left(\frac{5}{2}\right)^{3/4} - \frac{17}{4} \right) e^{i\frac{3}{4}\pi} \\
&= \frac{\pi}{\sin(3\pi/4)} \left(\frac{17}{4} - 2 \left(\frac{5}{2}\right)^{3/4} \right) = \sqrt{2} \pi \left(\frac{17}{4} - 2 \left(\frac{5}{2}\right)^{3/4} \right).
\end{aligned}$$

Uwaga.

Przykład ten wyjaśnia dlaczego residuum w $z = \infty$ jest zdefiniowane z minusem: chodzi o to, by po przeniesieniu całki po okręgu o promieniu R na drugą stronę równości wzór wyglądał jednolicie, tj. by obliczana całka była dana przez sumę wszystkich residuów (razy $2\pi i$) włączając w to residuum w $z = \infty$. Pozwala to zapomnieć o okręgu o promieniu R i przyjąć bardziej wyrafinowaną interpretację, według której kontur “kość właściwa” jest brzegiem obszaru zwartego znajdującego się (z punktu widzenia rysunku 13) na zewnątrz niego i będącego uzwarconą przez dołączenie punktu $z = \infty$ częścią powierzchni Riemanna¹⁴ właściwej dla funkcji $f(z)$.

Zadanie

Metodą residuów obliczyć całkę

$$\int_{-a}^a dx f(x) = \int_{-a}^a dx \sqrt{a^2 - x^2}.$$

¹⁴Bardzo elementarne, ale interesujące i uzupełnione rysunkami omówienie powierzchni Riemanna można znaleźć w “cegle” R. Penrosa *Droga do rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, Warszawa 200?

Rozwiązanie: Całkujemy po konturze “kość” (“na talerzu”, rysunek 13) funkcję

$$f(z) = -(z-a) \left| \frac{z+a}{a-z} \right|^{1/2} e^{\frac{i}{2}(\varphi_1 - \varphi_2 + \pi)}.$$

Na górnym prostym fragmencie kości (gdzie $\varphi_1 = 0$, a $\varphi_2 = \pi$) redukuje się ona do $f(x)$, a na dolnym fragmencie kości (gdzie $\varphi_2 = 2\pi$, a $\varphi_1 = \pi$) $f(x-i0) = e^{i\pi} f(x)$. Całki po małych okręgach znikają jak zwykle, a poza tym funkcja $f(z)$ jest wewnątrz obszaru obejmowanego przez kontur holomorphy. Mamy zatem, po “wyprostowaniu” granic całki po dolnym fragmencie kości, związek

$$(1 - e^{i\pi}) \int_{-a}^a dx f(x) = 2 \int_{-a}^a dx \sqrt{a^2 - x^2} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=\infty}.$$

Z postaci funkcji jest jasne, że ma ona w $z = \infty$ biegun pierwszego rzędu (rośnie z z liniowo), więc

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = -\frac{1}{2} \lim_{z \rightarrow \infty} z^3 \frac{d^2}{dz^2} f(z).$$

Obliczamy:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} f(z) &= -\left(\frac{z+a}{a-z}\right)^{1/2} - (z-a) \left(\frac{z+a}{a-z}\right)^{-1/2} \frac{1}{2} \left[\frac{1}{a-z} + \frac{z+a}{(a-z)^2} \right] \\ &= -\left(\frac{z+a}{a-z}\right)^{1/2} \left[1 + (z-a) \frac{a-z}{z+a} \frac{a}{(a-z)^2} \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dz^2} f(z) &= \frac{d}{dz} \left\{ -\left(1 - \frac{a}{z+a}\right) \left(\frac{z+a}{a-z}\right)^{1/2} \right\} \\ &= -\left(\frac{z+a}{a-z}\right)^{1/2} \frac{a}{(z+a)^2} - \frac{z}{z+a} \left(\frac{z+a}{a-z}\right)^{-1/2} \frac{a}{(a-z)^2} \\ &= \left(\frac{z+a}{a-z}\right)^{1/2} \frac{a^2}{(z+a)^2(z-a)}. \end{aligned}$$

Po pomnożeniu przez z^3 i wzięciu granicy $z \rightarrow \infty$ z uwzględnieniem tego, że wtedy $\varphi_1 \rightarrow \varphi_2$ (tj. że czynnik w dużym nawiasie dąży do $e^{i\frac{\pi}{2}}$) znajdujemy

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = \frac{(-1)^1}{2!} e^{i\frac{\pi}{2}} a^2 = -\frac{i}{2} a^2.$$

Residuum to można w zasadzie znaleźć przez “inspekcję”:

$$\begin{aligned} f(z) &= \sqrt{a^2 - z^2} = \sqrt{-z^2} \left[1 - \left(\frac{a}{z}\right)^2 \right]^{1/2} = -iz \left(1 - \frac{1}{2} \frac{a^2}{z^2} + \dots \right) \\ &= -i \left(z - \frac{a^2}{2z} + \dots \right). \end{aligned}$$

Czynnik fazowy $-i = -e^{i\frac{\pi}{2}}$ pochodzi z czynnika $e^{i\pi\alpha}$ będącego dla $\varphi_1 \rightarrow \varphi_2$ fazą niewymiernego kawałka funkcji $f(z)$, oraz z minusa występującego w przy wiodącym wyrazie (dla $z \rightarrow \infty$) w funkcji wymiernej mnożącej czynnik niewymierny w razie wątpliwości całkowity czynnik fazowy residuum musi być ona taka, by wynik całki był dodatni!). Stąd od razu widać rezultat uzyskany wyżej przez żmudne różniczkowanie (pamiętamy, że residuum jest równe $-a_{-1}$!).

Łącząc wyniki, znajdujemy, że

$$\int_{-a}^a dx \sqrt{a^2 - x^2} = \frac{\pi}{2} a^2.$$

Wynik ten łatwo uogólnić na całkę od a do b z funkcji $[(x-a)(b-x)]^{1/2}$. Stosując metodę “inspekcji” mamy

$$\begin{aligned} \sqrt{(z-a)(b-z)} &= -iz \left[1 - \frac{(a+b)}{z} + \frac{ab}{z^2} \right]^{1/2} \\ &= -iz \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{(a+b)}{z} + \frac{ab}{z^2} \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{(a+b)}{z} + \frac{ab}{z^2} \right)^2 + \dots \right] \\ &= -i \left(z - \frac{1}{2}(a+b) - \frac{(b-a)^2}{8z} + \dots \right), \end{aligned}$$

skąd już widać, że

$$\int_a^b dx \sqrt{(x-a)(b-x)} = \frac{\pi}{8} (b-a)^2.$$

Zadanie

Metodą residuów obliczyć całkę

$$\int_{-a}^a dx \frac{x^4}{\sqrt{a^2 - x^2}}.$$

Rozwiązanie: Znów, ponieważ po standardowych krokach mamy

$$2 \int_{-a}^a dx \frac{x^4}{\sqrt{a^2 - x^2}} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=\infty},$$

zadanie sprowadza się do znalezienia residuum w $z = \infty$ funkcji

$$f(z) = \frac{z^4}{\sqrt{a^2 - z^2}} = \frac{z^4}{z+a} \left(\frac{z+a}{a-z} \right)^{1/2},$$

z tym, że teraz jest to mniej przyjemne, bo punkt w nieskończoności jest biegunem trzeciego rzędu (trzeba by było liczyć czwartą pochodną). Możemy jednak posłużyć się metodą “inspekcji”

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{z^4}{\sqrt{-z^2}} \left[1 - \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right]^{-1/2} = i \frac{z^4}{z} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{a^2}{z^2} + \frac{3}{8} \frac{a^4}{z^4} \dots \right) \\ &= i \left(z^3 + \frac{a^2}{2} z + \frac{3}{8} \frac{a^4}{z} + \dots \right), \end{aligned}$$

skąd od razu widać, że

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = -i \frac{3}{8} a^4,$$

a więc (co potwierdza program *Mathematica*)

$$\int_{-a}^a dx \frac{x^4}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \frac{3}{8} \pi a^4.$$

Zadanie.

Metodą residuów obliczyć całkę

$$\int_0^1 dx \sqrt{x^3 - x^4}.$$

Rozwiązanie: Całkujemy po konturze z rysunku 13 funkcję

$$f(z) = z^2 \left(\frac{z}{1-z} \right)^{-1/2}.$$

Z jej postaci od razu widać, że poza rozcięciem jest ona holomorficzna aż do punktu w nieskończoności, w którym to punkcie ma ona biegun drugiego rzędu. Ponieważ wykładnik $\alpha = -\frac{1}{2}$, mamy

$$(1 - e^{-i\pi}) \int_0^1 dx \sqrt{x^3 - x^4} \equiv 2 \int_0^1 dx \sqrt{x^3 - x^4} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=\infty}.$$

Residuum w $z = \infty$ najprościej znaleźć przez “inspekcję” (obliczanie trzeciej pochodnej nie jest zachęcające...). Rozwijamy więc dla dużych z pierwiastek:

$$f(z) = \sqrt{-z^4} \left(1 - \frac{1}{z} \right)^{1/2} = -iz^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{z} \right) - \frac{1}{8} \left(-\frac{1}{z} \right)^2 + \frac{1}{16} \left(-\frac{1}{z} \right)^3 + \dots \right]$$

(pamiętamy, że czynnik fazowy w residuum pochodzi z czynnika $e^{i\alpha\pi}$, więc tu jest równy $-i$ bo $\alpha = -\frac{1}{2}$ oraz że residuum jest równe współczynnikowi przy $1/z$ wziętemu z minusem!). Stąd już widać, że

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = \frac{-i}{16},$$

a zatem

$$\int_0^1 dx \sqrt{x^3 - x^4} = \frac{\pi}{16}.$$

Zadanie

Metodą residuów obliczyć całkę

$$\int_0^2 dx [x^2(2-x)^3]^{1/5}.$$

Rozwiązanie: Całkujemy po konturze z rysunku 13 funkcję

$$f(z) = (2-z) \left(\frac{z}{2-z} \right)^{2/5},$$

mającą, poza rozcięciem, tylko biegun pierwszego rzędu w $z = \infty$. Zgodnie z regułą przedłużania funkcji na dolną część “kości”, mamy

$$(1 - e^{i\frac{4}{5}\pi}) \int_0^2 dx [x^2(2-x)^3]^{1/5} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=\infty}.$$

Znów residuum w $z = \infty$ najłatwiej znaleźć dokonując rozwinięcia $f(z)$ dla dużych z :

$$f(z) = (-z^5)^{1/5} \left(1 - \frac{2}{z}\right)^{3/5} = -e^{i\frac{2}{5}\pi} z \left[1 + \frac{3}{5} \left(-\frac{2}{z}\right) - \frac{3}{25} \left(-\frac{2}{z}\right)^2 + \dots\right],$$

z którego od razu widać, że

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = \frac{-12}{25} e^{i\frac{2}{5}\pi}.$$

Czynnik fazowy $e^{i\frac{2}{5}\pi}$ jest pojawiającym się zawsze w tego typu rachunku czynnikiem $e^{i\frac{2}{5}(\varphi_1 - \varphi_2 + \pi)}$, w którym $\varphi_1 \rightarrow \varphi_2$ (gdy $z \rightarrow \infty$). Dodatkowy minus (kompensujący minus w definicji residuum pochodzi z tego, że w “kanonicznej” postaci funkcja ma czynnik $(2-z)$ dający minus przy $z \rightarrow \infty$). Oczywiście poprawność wyznaczenia residuum inspekcji można zawsze sprawdzić stosując ucziwie wzór z pochodnymi.

Tak więc

$$\int_0^2 dx [x^2(2-x)^3]^{1/5} = \frac{2\pi i}{1 - e^{i\frac{4}{5}\pi}} e^{i\frac{2}{5}\pi} \left(\frac{-12}{25} \right) = \frac{12}{25} \frac{\pi}{\sin(2\pi/5)}.$$

Zadanie.

Podać warunek zbieżności całki

$$\int_0^1 dx x^\alpha (1-x)^{1-\alpha}$$

i obliczyć ją metodą residuów.

Rozwiązanie: Całka jest zbieżna dla $x \rightarrow 0$, gdy $\alpha > -1$ i zbieżna dla $x \rightarrow 1$, gdy $1 - \alpha > -1$. Stąd warunkiem jej zbieżności jest $-1 < \alpha < 2$. Aby ją obliczyć całkujemy po konturze z rysunku 13 funkcję

$$f(z) = (1 - z) \left(\frac{z}{1 - z} \right)^\alpha.$$

Funkcja ta ma tylko biegun pierwszego rzędu w $z = \infty$. Aby znaleźć jej residuum różniczkujemy dwakroć:

$$\frac{d}{dz} f(z) = \left(\frac{z}{1 - z} \right)^\alpha \left[-1 + \frac{\alpha}{z} \right].$$

$$\frac{d^2}{dz^2} f(z) = \alpha \left(\frac{z}{1 - z} \right)^\alpha \left[-\frac{1}{z^2} + \frac{\alpha - z}{z^2(1 - z)} \right] = \left(\frac{z}{1 - z} \right)^\alpha \frac{\alpha(\alpha - 1)}{z^2(1 - z)}.$$

Podstawiając do wzoru na residuum i biorąc granicę $z \rightarrow \infty$ otrzymujemy

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = \frac{(-1)}{2} \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\alpha(\alpha - 1)z^3}{z^2(1 - z)} \left(\frac{z}{1 - z} \right)^\alpha = \frac{1}{2} \alpha(\alpha - 1) e^{i\alpha\pi}.$$

Zatem (jak można sprawdzić programem *Mathematica*)

$$\int_0^1 dx x^\alpha (1 - x)^{1-\alpha} = \frac{2\pi i}{1 - e^{2\pi i \alpha}} \frac{1}{2} \alpha(\alpha - 1) e^{i\alpha\pi} = -\frac{\alpha(\alpha - 1)\pi}{2 \sin(\alpha\pi)}.$$

Zadanie.

Metodą residuów obliczyć całkę

$$\int_{-1}^1 \frac{dx}{(x - a)\sqrt{1 - x^2}},$$

dla $|a| > 1$ oraz dla $|a| < 1$.

Rozwiązanie: Gdy $|a| > 1$, całka jest standardowa. Całkujemy po konturze z rysunku 13 funkcję

$$f(z) = \frac{1}{(z - a)(z + 1)} \left(\frac{z + 1}{1 - z} \right)^{1/2},$$

która ma tylko biegun prosty w $z = a$; rozwinięcie

$$f(z) = \frac{1}{z^2} \left(1 - \frac{a}{z} \right)^{-1} \left(1 + \frac{1}{z} \right)^{-1/2} \left(-1 + \frac{1}{z} \right)^{-1/2},$$

w szereg dla dużych wartości z pokazuje, że punkt $z = \infty$ jest jej punktem regularnym.

Całki po małych okręgach o promieniach ε jak zwykle znikają w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$, podobnie jak całka po dużym okręgu o promieniu $R > a$ (ta druga właśnie dlatego, że $z = \infty$ jest punktem regularnym). Zatem

$$2 \int_{-1}^1 \frac{dx}{(x-a)\sqrt{1-x^2}} = 2\pi i \operatorname{res} f(z)|_{z=a}.$$

Z kolei

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=a} = \lim_{z \rightarrow a} \frac{1}{(z+1)} \left(\frac{z+1}{1-z} \right)^{1/2} = \frac{1}{(a+1)} \left| \frac{a+1}{1-a} \right|^{1/2} e^{i\frac{\pi}{2}},$$

bo dla $a > 1$ mamy $\varphi_2 = \varphi_1 = 0$, a dla $a < -1$ mamy $\varphi_2 = \varphi_1 = \pi$, czyli w obu przypadkach $i\alpha(\varphi_2 - \varphi_1 + \pi) = i\pi/2$ (oczywiście dla $a \in \mathbb{C}$ faza wyszłaby inna; całka nie byłaby wtedy rzeczywista). Zatem dla $|a| > 1$

$$\int_{-1}^1 \frac{dx}{(x-a)\sqrt{1-x^2}} = -\frac{\pi}{(a+1)} \left| \frac{a+1}{1-a} \right|^{1/2} = -\frac{a}{|a|} \frac{\pi}{\sqrt{a^2-1}},$$

(dla $a > 1$ całka jest ujemna, a dla $a < -1$ - dodatnia).

Gdy $|a| < 1$, całka nie jest zbieżna bezwzględnie, ale istnieje w sensie wartości głównej i wynosi wtedy zero. Aby się o tym przekonać, zmieniamy nieco kontur całkowania: mamy bowiem teraz biegun położony na rozcięciu i w celu ominięcia go, zastępujemy “kość właściwą” z rysunku 13 konturem Γ' “kość z gulką” pokazanym na rysunku 14. Jak zwykle całki po okręgach o promieniach ε wokół punktów $z = \pm 1$ znikają w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ i pozostaje przeanalizować wpływ całek po dwu małych półokręgach o promieniu ε wokół punktu $z = a$. Zgodnie z regułą przedłużania funkcji mamy więc

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma'} dz f(z) &= \int_{-1}^{a-\varepsilon} dx f(x) + \int_{\frac{1}{2}K^-(a)}^{\text{górn}} dz f_+(z) + \int_{a+\varepsilon}^1 dx f(x) \\ &+ \int_1^{a+\varepsilon} dx e^{i\pi} f(x) + \int_{\frac{1}{2}K^-(a)}^{\text{dół}} dz f_-(z) + \int_{a-\varepsilon}^{-1} dx e^{i\pi} f(x) = 0. \end{aligned}$$

$f_{\pm}(z)$ oznaczają tu odpowiednio przedłużone wartości funkcji. Cała ta całka jest równa zeru, gdyż na zewnątrz konturu z rysunku 14 няма żadnych punktów osobliwych: residuum w $z = \infty$ znika (dzięki czemu znika całka po okręgu o promieniu R), a biegun w $z = a$ teraz leży na rozcięciu, które z punktu widzenia konturu składającego się z dużego okręgu o promieniu R i “kości” (“z gulką”), leży na zewnątrz obejmowanego przezeń obszaru.

W granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ cztery skrajne całki z sumy sześciu całek wypisanych powyżej dają podwojoną szukaną całkę. Z osobna każda z dwu całek po górnym i dolnym fragmencie

okręgu otaczającego biegun na rozcięciu (na których to obu fragmentach $z = a + \varepsilon e^{i\varphi}$), daje w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ wynik skończony:

$$\int_{\frac{1}{2}K^-(a)}^{\text{górn}} dz f_+(z) = \int_{\pi}^0 d\varphi i\varepsilon e^{i\varphi} \frac{1}{\varepsilon e^{i\varphi} (1 + \varepsilon e^{i\varphi})} \left(\frac{z+1}{1-z} \right)_+^{1/2} = -i\pi \left(\frac{a+1}{1-a} \right)_+^{1/2},$$

$$\int_{\frac{1}{2}K^-(a)}^{\text{dół}} dz f_-(z) = \int_{2\pi}^{\pi} d\varphi i\varepsilon e^{i\varphi} \frac{1}{\varepsilon e^{i\varphi} (1 + \varepsilon e^{i\varphi})} \left(\frac{z+1}{1-z} \right)_-^{1/2} = -i\pi \left(\frac{a+1}{1-a} \right)_-^{1/2}.$$

Jednaże, jak wynika z reguły przedłużania czynnika w nawiasie (wartość bezwzględna razy czynnik fazowy równy $\frac{i}{2}(\varphi_1 - \varphi_2 + \pi)$), wartości czynników w nawiasach są dokładnie przeciwne (jest to ta sama różnica w znakach, która powoduje, że całki po górnym i dolnym brzegu kości dodają się do siebie!) i obie te całki wzajem się znoszą. W rezultacie

$$P \int_{-1}^1 \frac{dx}{(x-a)\sqrt{1-x^2}} = 0 \quad \text{gdy } |a| < 1.$$

Zauważmy jeszcze, że dla $a = 0$ wynik ten (w sensie wartości głównej) jest oczywisty, jako że jest to wtedy całka z funkcji nieparzystej w symetrycznych granicach.

Zadanie

Obliczyć całkę

$$J = \int_a^b \frac{dr}{r} \sqrt{(r-a)(b-r)}.$$

Całka taka pojawia się np. przy narzucaniu warunków kwantyzacji Bohra-Sommerfelda na ruch elektronu w polu jądra atomu (potencjał Coulomba). Przy takim zastosowaniu r jest odległością od centrum, a parametry a i b - odległościami najmniejszą i największą punktów toru od centrum przyciągającego (punktami zwrotnymi ruchu radialnego). Tu jednak możemy rozpatrzyć wszystkie trzy przypadki: $0 < a < b$, $a < b < 0$ oraz $a < 0 < b$.

Rozwiązanie: Zaczniemy od dwu pierwszych przypadków, w których osobliwość funkcji podcałkowej w $x = 0$ znajduje się poza zakresem całkowania. Jak poprzednio całkujemy wtedy po konturze “kość na talerzu” (rysunek 13) funkcję

$$f(z) = \frac{b-z}{z} \left(\frac{z-a}{b-z} \right)^{1/2} \equiv \frac{b-z}{z} \left| \frac{z-a}{b-z} \right|^{1/2} e^{\frac{i}{2}(\varphi_a - \varphi_b + \pi)}.$$

Zgodnie z przepisem, $f(r+i0) = f(r)$, a $f(r-i0) = e^{i\pi} f(r) = -f(r)$. Ponieważ całki po małych okręgach znikają więc

$$2 \int_a^b \frac{dr}{r} \sqrt{(r-a)(b-r)} = 2\pi i (\text{res } f(z)|_{z=0} + \text{res } f(z)|_{z=\infty}).$$

W $z = 0$ funkcja ma biegun prosty.

$$\text{res } f(z)|_{z=0} = b \left(\frac{-a}{b} \right)^{1/2} = \sqrt{ab} e^{\frac{i}{2}\pi},$$

zgodnie z przepisem, jako że dla $0 < a < b$ punkt $z = 0$ leży na osi rzeczywistej albo na lewo od obu punktów rozgałęzienia (i wobec tego $\varphi_a = \varphi_b = \pi$ w $z = 0$), albo na prawo (i wtedy $\varphi_a = \varphi_b = 0$ w $z = 0$). Z kolei w $z = \infty$ funkcja $f(z)$ ma biegun zerowego rzędu, gdyż rozwinięcie

$$f(z) = - \left(1 - \frac{b}{z}\right) \left(-\frac{1 - a/z}{1 - b/z}\right)^{1/2},$$

daje $a_0 z^0$ jako wyraz z najwyższą potęgą z . Zatem

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = z^2 f'(z)|_{z=\infty},$$

gdzie

$$\begin{aligned} f'(z) &= \left[-\frac{1}{z} - \frac{b-z}{z^2}\right] \left(\frac{z-a}{b-z}\right)^{1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{z-a}{b-z}\right)^{-1/2} \left[\frac{1}{b-z} + \frac{z-a}{(b-z)^2}\right] \frac{b-z}{z} \\ &= \left(\frac{z-a}{b-z}\right)^{1/2} \left[-\frac{b}{z^2} + \frac{b-z}{2z} \frac{b-a}{(z-a)(b-z)}\right]. \end{aligned}$$

Mnożąc przez z^2 i biorąc granicę $z \rightarrow \infty$ znajdujemy

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=\infty} = -\frac{1}{2}(a+b) e^{\frac{i}{2}\pi}.$$

Ostatecznie więc

$$J = \int_a^b \frac{dr}{r} \sqrt{(r-a)(b-r)} = \frac{1}{2} 2\pi i e^{\frac{i}{2}\pi} \left[\sqrt{ab} - \frac{1}{2}(a+b)\right] = \frac{\pi}{2} (a+b - 2\sqrt{ab}).$$

W przypadku $a < 0 < b$ punkt osobliwy $z = 0$ funkcji podcałkowej leży na rozcięciu. Trzeba wówczas zastąpić kość właściwą z rysunku 13 konturem “kością z gulką” pokazaną na rysunku 14, aby wyizolować tę osobliwość. Mamy wtedy z twierdzenia o residuach, po wzięciu granicy $R \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow \infty$ (tu ε jest jeszcze - bo za użyjemy tego samego symbolu do “obróbki” całek po “gulce” - promieniem małych okręgów obiegających punkty $z = a$ i $z = b$) związek

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma'} dz f(z) &= 2 \left(\int_a^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^b \right) \frac{dr}{r} \sqrt{(r-a)(b-r)} \\ &\quad + \int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^-(0)}^{góra} dz f(z) + \int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^-(0)}^{dół} dz f(z) = \pi(a+b). \end{aligned}$$

Po prawej stronie uwzględniony został teraz tylko przyczynik od residuum w $z = \infty$. Na górnym półokręgu obiegającym $z = 0$ piszemy $z = \varepsilon e^{i\varphi}$ i

$$\int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^-(0)}^{góra} dz f(z) = \int_{\pi}^0 d\varphi i (b - \varepsilon e^{i\varphi}) \left| \frac{\varepsilon e^{i\varphi} - a}{b - \varepsilon e^{i\varphi}} \right|^{1/2} \rightarrow -i\pi\sqrt{ab},$$

gdyż w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ faza $\varphi_a - \varphi_b + \pi = 0 - \pi + \pi = 0$. Z kolei całka po dolnym półokręgu obiegającym $z = 0$ daje

$$\int_{\frac{1}{2}K_{\varepsilon}^{-}(0)}^{dół} dz f(z) = \int_{2\pi}^{\pi} d\varphi i (b - \varepsilon e^{i\varphi}) \left| \frac{\varepsilon e^{i\varphi} - a}{b - \varepsilon e^{i\varphi}} \right|^{1/2} e^{\frac{i}{2}(\varphi_a - \varphi_b + \pi)} \rightarrow -i\pi\sqrt{ab} e^{\frac{i}{2}2\pi} = i\pi\sqrt{ab},$$

gdyż w granicy $\varepsilon \rightarrow 0$ faza $\varphi_a - \varphi_b + \pi = 2\pi - \pi + \pi = 2\pi$. Obie całki po półokręgach znoszą się wzajemnie i wobec tego znajdujemy, że gdy $a < 0 < b$

$$J = P \int_a^b \frac{dr}{r} \sqrt{(r-a)(b-r)} = \frac{\pi}{2} (a+b).$$

(Dopisujemy znak wartości głównej, gdyż tak właśnie należy interpretować otrzymany wynik dla tej całki niewłaściwej.) Oczywiście dla $a = -b$ wynik jest oczywisty, gdyż jest to wtedy całka z funkcji nieparzystej w symetrycznych granicach.

W pierwszych dwu przypadkach, $0 < a < b$ i $a < b < 0$ całkę tę można także obliczyć konwencjonalnie za pomocą następującego chwytu. Definiujemy parametry $t \equiv ab$ oraz $p \equiv a+b$ i piszemy

$$J(t, p) = \int_a^b \frac{dr}{r} \sqrt{(r-a)(b-r)} = \int_a^b \frac{dr}{r} \sqrt{-r^2 + pr - t}.$$

Mamy wtedy

$$\frac{\partial J(t, p)}{\partial t} = -\frac{1}{2} \int_a^b \frac{dr}{r \sqrt{(r-a)(b-r)}}.$$

Podstawiamy teraz $r = 1/\xi$, $dr/r = -d\xi/\xi$, tak iż

$$\frac{\partial J(t, p)}{\partial t} = -\frac{1}{2\sqrt{ab}} \int_{a'}^{b'} \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi-a')(b'-\xi)}},$$

gdzie $a' = 1/b$ i $b' = 1/a$. Następnie dokonujemy kolejnego podstawienia

$$\xi = \frac{1}{2}(a' + b') + \frac{1}{2}(a' - b')\eta,$$

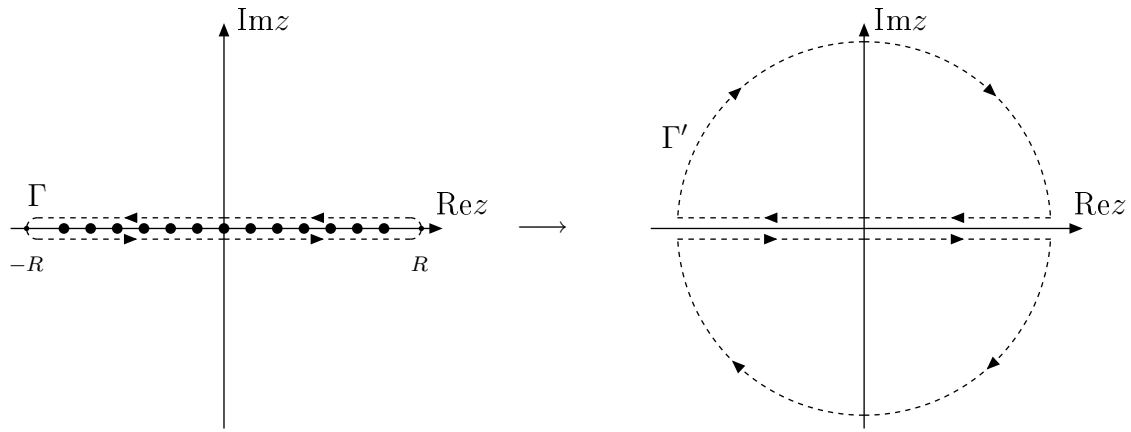
które prowadzi do wyniku

$$\frac{\partial J(t, p)}{\partial t} = -\frac{1}{2\sqrt{ab}} \int_{-1}^{+1} \frac{d\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} = -\frac{\pi}{2\sqrt{ab}} = -\frac{\pi}{2\sqrt{t}}$$

Całkując mamy

$$J(t, p) = -\pi\sqrt{t} + h(p) = -\pi\sqrt{t} + \frac{\pi}{2}p = \frac{\pi}{2} (a+b-2\sqrt{ab}),$$

gdyż będąca “stałą” całkowania funkcja $h(p)$ musi być taka, że $J(t, p = 2\sqrt{t}) = 0$ (tj. $J = 0$ dla $a = b$).



Rysunek 15: Deformacja konturu całkowania Γ do Γ' umożliwiająca sumowanie szeregów.

Zadanie

Posługując się twierdzeniem o residuach zsumować szereg

$$S = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2 + a^2}.$$

Wykorzystać wynik, by podać sumę szeregu

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}.$$

Rozwiązanie: Zgodnie z twierdzeniem o residuach, szereg o wyrazach dodatnich $g(n)$, takich, że funkcja $g(z)$ nie ma punktów osobliwych na osi rzeczywistej, można przedstawić w postaci całki z funkcji

$$f(z) = \pi \operatorname{ctg}(\pi z) g(n),$$

po konturze Γ pokazanym w lewej części rysunku 15. Rzeczywiście: funkcja $f(z)$ wewnątrz tego konturu, tj. na osi rzeczywistej, ma tylko bieguny proste w $z = n \in \mathbb{Z}$ pochodzące (zgodnie z założeniem) tylko od funkcji $\pi \operatorname{ctg}(\pi z)$. Z uwagi na periodyczność cotangensa, residua tych biegunów funkcji $\pi \operatorname{ctg}(\pi z)$ są wszystkie takie same jak residuum w $z = 0$:

$$\operatorname{res} \pi \operatorname{ctg}(\pi z)|_{z=0} = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\pi z}{\sin(\pi z)} \cos(\pi z) = 1.$$

Zatem

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=n} = g(n),$$

a stąd, w granicy $R \rightarrow \infty$,

$$\oint_{\Gamma} dz f(z) = 2\pi i \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n).$$

Całki po małych półokręgach domykających proste fragmenty konturu Γ znikają w granicy, w której ich promienie dążą do zera.¹⁵

Aby znaleźć sumę szeregu deformujemy teraz (przed wzięciem granicy $R \rightarrow \infty$) kontur Γ do konturu Γ' pokazanego w prawej części rysunku 15 składającego się z dwu zamkniętych konturów położonych jeden w górnej, a drugi w dolnej półpłaszczyźnie zespolonej zmiennej z i obieganym w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara (a więc mających niestandardową orientację). Dzięki temu możemy napisać

$$2\pi i \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n) = \oint_{\Gamma} dz f(z) = \oint_{\Gamma'} dz f(z) = -2\pi i \sum_i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_i} ,$$

przy czym suma rozciąga się na wszystkie punkty osobliwe funkcji $f(z)$ znajdujące się wewnątrz obu części konturu Γ' (punkty osobliwe na osi rzeczywistej są teraz *na zewnątrz* obszarów obejmowanych przez Γ'). Minus po prawej stronie jest skutkiem niestandardowego kierunku obieganego konturu Γ' . Tak więc

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n) = - \sum_i \operatorname{res} f(z)|_{z=z_i} .$$

W przypadku $g(n) = 1/(n^2 + a^2)$ funkcja $f(z)$ ma wewnątrz konturu Γ' dwa bieguny proste w $z = \pm i|a|$, których residua oblicza się prosto:

$$\begin{aligned} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2 + a^2} &= - \left(\frac{\pi \operatorname{ctg}(i\pi|a|)}{2i|a|} + \frac{\pi \operatorname{ctg}(-i\pi|a|)}{-2i|a|} \right) = - \frac{\pi \operatorname{ctg}(i\pi a)}{ia} \\ &= - \frac{\pi}{ia} \frac{i(e^{-\pi a} + e^{\pi a})}{e^{-\pi a} - e^{\pi a}} = \frac{\pi}{a} \frac{\operatorname{ch}(\pi a)}{\operatorname{sh}(\pi a)} . \end{aligned}$$

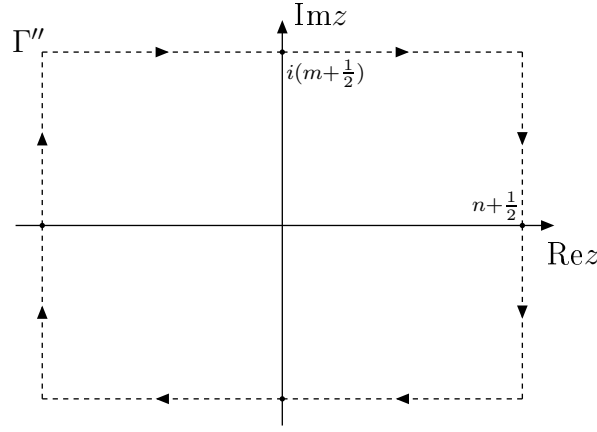
Aby zsumować szereg $1/n^2$ zapisujemy go w postaci¹⁶

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} &= \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2 + a^2} - \frac{1}{a^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left(\frac{\pi}{a} \frac{1 + \frac{1}{2}\pi^2 a^2 + \dots}{\pi a (1 + \frac{1}{6}\pi^2 a^2 + \dots)} - \frac{1}{a^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left\{ \frac{1}{a^2} \left[\left(1 + \frac{1}{2}\pi^2 a^2 + \dots \right) \left(1 - \frac{1}{6}\pi^2 a^2 + \dots \right) - 1 \right] \right\} = \frac{\pi^2}{6} . \end{aligned}$$

Aby wszystko było zalegalizowane, trzeba jeszcze wykazać, że w granicy $R \rightarrow \infty$ znikają całki po dwu dużych półokręgach. Zamiast wykazywać to dla tych półokręgów

¹⁵Trzeba przy tym dopowiedzieć, że bierzemy $R \neq k \in \mathbb{N}_+$, aby środki domykających półokręgów nie wypadały w biegunach funkcji cotangens.

¹⁶Rozwinięcia w szeregi Taylora funkcji hiperbolicznych są takie same jak zwykłych funkcji trygonometrycznych z tym, że wszystkie minusy trzeba zamienić na plusy.



Rysunek 16: Prostokąt, do którego deformujemy półokręgi konturu Γ' .

zdeformujemy je do prostokątnego konturu Γ'' pokazanego na rysunku 16 i wykażemy znikanie całek po tym prostokącie w granicy, w której jego rozmiary rosną do nieskończoności. Taka deformacja konturu jest dopuszczalna, gdyż nie przecinamy przy tym żadnych biegunów (należy pamiętać, że prostokąt reprezentuje dwa prostokąty, jeden w górnej, drugi w dolnej półpłaszczyźnie domknięte prostymi równoległymi do osi rzeczywistej, tak jak w konturze Γ'). Aby przy rozszerzaniu boków prostokąta kontur nie przechodził przez leżące na osi rzeczywistej biegunki funkcji cotangens zakładamy, że jego pionowe boki przechodzą przez punkty $z = \pm n + \frac{1}{2}$; poziome boki można anlogicznie przeprowadzić przez punkty $z = i(\pm m + \frac{1}{2})$ (przy czym, $m, n \in \mathbb{N}$ i $m, n \rightarrow \infty$). Szacujemy całki po bokach konturu:

$$\left| \oint_{\Gamma''} dz \frac{\pi \operatorname{ctg}(\pi z)}{z^2 + a^2} \right| \leq \pi \oint_{\Gamma''} |dz| \frac{|\operatorname{ctg}(\pi z)|}{|z|^2 - a^2}.$$

(Symbol $|dz|$ oznacza, że kierunek całkowania wybieramy tak, by całka była dodatnia). Podstawiamy $z = x + iy$ (dla całek po bokach pionowych $x = \pm n + \frac{1}{2}$ i $-\infty < y < \infty$, a dla całek po bokach poziomych $y = \pm m + \frac{1}{2}$ i $-\infty < x < \infty$):

$$\begin{aligned} |\operatorname{ctg}(\pi(x + iy))| &= \left| \frac{\cos(\pi x + i\pi y)}{\sin(\pi x + i\pi y)} \right| = \left| \frac{\cos(\pi x) \operatorname{ch}(\pi y) - i \operatorname{sh}(\pi y) \sin(\pi x)}{\sin(\pi x) \operatorname{ch}(\pi y) + i \operatorname{sh}(\pi y) \cos(\pi x)} \right| \\ &= \left[\frac{(\cos(\pi x) \operatorname{ch}(\pi y))^2 + (\operatorname{sh}(\pi y) \sin(\pi x))^2}{(\sin(\pi x) \operatorname{ch}(\pi y))^2 + (\operatorname{sh}(\pi y) \cos(\pi x))^2} \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

Jeśli teraz podstawimy $x = \pm n + \frac{1}{2}$ szacując całki po bokach pionowych, to wyzerują się cosinusy πx , a kwadraty sinusów πx staną się jedynkami; zatem na bokach, na których $z = \pm n + \frac{1}{2} + iy$

$$|\operatorname{ctg}(\pi(x + iy))| = \left| \frac{\operatorname{sh}(\pi y)}{\operatorname{ch}(\pi y)} \right| = |\operatorname{th}(\pi y)| < 1,$$

wobec czego ($N \equiv \pm n + \frac{1}{2}$)

$$\left| \int_{\text{bok pion}} dz \frac{\pi \operatorname{ctg}(\pi z)}{z^2 + a^2} \right| \leq \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\pi dy}{y^2 + N^2 - a^2} = \frac{\pi}{\sqrt{N^2 - a^2}} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{y}{\sqrt{N^2 - a^2}} \right) \right]_{-\infty}^{\infty} \rightarrow 0,$$

gdy $N^2 \rightarrow \infty$. Przy szacowaniu całek po bokach poziomych będziemy zaś mieli

$$|\operatorname{ctg}(\pi(x + iy))| = \left[\frac{\cos^2(\pi x) + \sin^2(\pi x) \operatorname{th}^2(\pi y)}{\sin^2(\pi x) + \cos^2(\pi x) \operatorname{th}^2(\pi y)} \right]^{1/2} \rightarrow 1,$$

gdy $y \rightarrow \infty$ ($m \rightarrow \infty$) i dalej szacowanie przebiega tak, jak dla boków pionowych. Zatem całki po bokach znikają, co oznacza, że znikają też całki po dużych półokręgach konturu Γ' i wyniki uzyskane powyżej zostają tym samym zalegalizowane.

Zadanie

Szereg

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)},$$

można zsumować “na piechotę”, wypisując bezpośrednio ciąg jego sum cząstkowych. Sprawdzić, że metoda wykorzystująca twierdzenie o residuach daje ten sam wynik.

Rozwiązanie: Aby zsumować szereg S wystarczy przedstawić ciąg jego sum cząstkowych w postaci

$$S_N \equiv \sum_{n=1}^N \frac{1}{n(n+1)} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} - \sum_{n=1}^N \frac{1}{n+1} = 1 + \sum_{n=2}^N \frac{1}{n} - \sum_{n'=2}^{N+1} \frac{1}{n'} = 1 - \frac{1}{N+1},$$

(w drugiej sumie przeszliśmy od sumowania po n do sumowania po $n' = n + 1$, co spowodowało zmianę zakresu sumowania). Wynika z niej natychmiast, że $S = 1$.

Bezpośrednio zastosować do badanego szeregu metody residuów nie można, bo bieguny funkcji $\pi \operatorname{ctg}(\pi z)/z(z+1)$ leżałyby wtedy na osi rzeczywistej. W związku z tym zsumujemy tą metodą szereg

$$\tilde{S}(a) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n(n+1)}{[n^2 + a^2][(n+1)^2 + a^2]}.$$

Mamy bowiem wtedy

$$S = \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \tilde{S}(a).$$

(Nie musimy tu nic od $\tilde{S}(a)$ odejmować gdyż wyrazy z $n = 0$ i $n = -1$ są i tak zerowe).

Zgodnie z metodą przedstawioną w poprzednim zadaniu, suma $\tilde{S}(a)$ jest dana przez residua funkcji

$$f(z) = \pi \operatorname{ctg}(\pi z) \frac{z(z+1)}{[z^2 + a^2][(z+1)^2 + a^2]},$$

w punktach osobliwych (są one biegunami prostymi) położonych poza osią rzeczywistą. Residua te są równe:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(z)|_{z=i|a|} &= -\frac{\pi \operatorname{cth}(\pi a)}{2a} \frac{i|a|(1+i|a|)}{1+2i|a|}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=-i|a|} &= -\frac{\pi \operatorname{cth}(\pi a)}{2a} \frac{-i|a|(1-i|a|)}{1-2i|a|}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=-1+i|a|} &= -\frac{\pi \operatorname{cth}(\pi a)}{2a} \frac{i|a|(-1+i|a|)}{1-2i|a|}, \\ \operatorname{res} f(z)|_{z=-1-i|a|} &= -\frac{\pi \operatorname{cth}(\pi a)}{2a} \frac{-i|a|(-1-i|a|)}{1+2i|a|}. \end{aligned}$$

Wykorzystana tu została periodyczność funkcji cotangens oraz wzorek $\operatorname{ctg}(i\pi a) = -i\operatorname{cth}(\pi a)$. Ich suma daje

$$\sum \operatorname{res} f(z)|_{z=z_i} = -\frac{2\pi i|a| \operatorname{ctg}(\pi a)}{2a} \left\{ \frac{1+i|a|}{1+2i|a|} - \frac{1-i|a|}{1-2i|a|} \right\}.$$

Po uporządkowaniu znajdujemy, że

$$\tilde{S}(a) = \frac{2\pi a}{1+4a^2} \operatorname{cth}(\pi a).$$

Zatem

$$S = \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \tilde{S}(a) = 1,$$

tak jak powinno było wyjść.

Jeszcze prościej można obliczyć S sumując szereg

$$\tilde{S}'(a) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{(n-ia)(n+1+ia)},$$

o wyrazach zespolonych.¹⁷ Rzeczywiście: odpowiednia funkcja ma teraz poza osią rzeczywistą dwa bieguny proste; jej residua w tych punktach są takie same, wobec czego

$$\tilde{S}'(a) = -\frac{2\pi \operatorname{ctg}(i\pi a)}{1+2ia} = \frac{2\pi i \operatorname{cth}(\pi a)}{1+2ia}.$$

¹⁷Dlaczego nie uda się tego zrobić za pomocą szeregu $\sum_{n=-\infty}^{\infty} 1/[(n-ia)(n+1-ia)]$?

Stąd już łatwo znaleźć S :

$$S = \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left\{ \frac{2\pi i \operatorname{cth}(\pi a)}{1 + 2ia} - \frac{2i}{a(1 + ia)} \right\}.$$

(teraz trzeba odjąć wyrazy z $n = 0$ i $n = 1$). Zatem

$$S = i \lim_{a \rightarrow 0} \left\{ (1 - 2ia + \dots) \frac{\pi \left(1 + \frac{1}{2}\pi^2 a^2 + \dots\right)}{\pi a \left(1 + \frac{1}{6}\pi^2 a^2 + \dots\right)} - \frac{1}{a} (1 - ia + \dots) \right\} = 1.$$

Zadanie

Zsumować szereg

$$S = \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(n - a)^2},$$

gdzie $a \notin \mathbb{Z}$. Wykorzystując wynik podać sumę szeregu $\sum_{n=1}^{\infty} (1/n^2)$.

Rozwiązanie: Tak jak w poprzednim zadaniu, można zastosować metodę wykorzystującą całkowanie po konturach z rysunku 15 zakładając, że a ma niezerową część urojoną, tak by punkt osobliwy funkcji

$$f(z) = \pi \operatorname{ctg}(\pi z) \frac{1}{(z - a)^2},$$

w $z = a$ nie leżał na osi rzeczywistej. Na koniec można będzie przejść z częścią urojoną a do zera.

W $z = a$ funkcja $f(z)$ ma biegun drugiego rzędu. Jej residuum w tym punkcie jest równe

$$\operatorname{res} f(z)|_{z=a} = \pi \left[\frac{d \operatorname{ctg}(\pi z)}{dz} \right]_{z=a} = - \frac{\pi^2}{\sin^2(\pi a)}.$$

Zatem z twierdzenia o residuach otrzymujemy natychmiast

$$S(a) = \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(n - a)^2} = \frac{\pi^2}{\sin^2(\pi a)},$$

przy czym wynik ten jest słuszny dla wszystkich $a \notin \mathbb{Z}$.

Sumę szeregu $\sum_{n=1}^{\infty} (1/n^2)$ można dostać ze wzoru

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} &= \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left[S(a) - \frac{1}{a^2} \right] = \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left[\frac{\pi^2}{\pi^2 a^2 \left(1 - \frac{1}{6}\pi^2 a^2 + \dots\right)^2} - \frac{1}{a^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left[\frac{1}{a^2} \left(1 + \frac{1}{6}\pi^2 a^2 + \dots\right)^2 - \frac{1}{a^2} \right] = \frac{\pi^2}{6}. \end{aligned}$$

Zadanie

Posługując się twierdzeniem o residuach zsumować szereg

$$S = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2 + a^2}.$$

Wykorzystać wynik, by podać sumę szeregu

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2}.$$

Rozwiązanie: W przypadku szeregu naprzemiennego o wyrazach $a_n = (-1)^n g(n)$ tworzymy funkcję

$$h(z) = \frac{\pi}{\sin \pi z} g(z),$$

która na osi rzeczywistej ma bieguny proste w punktach $z = n$. Residua funkcji $h(z)$ w tych punktach są równe $g(n)$ razy odpowiednie residuum funkcji $\pi/\sin(\pi z)$:

$$\operatorname{res} \frac{\pi}{\sin \pi z} \Big|_{z=n} = \lim_{z \rightarrow n} \frac{\pi(z-n)}{\sin[\pi(z-n) + n\pi]} = \lim_{z \rightarrow n} \frac{\pi(z-n)}{\sin[\pi(z-n)] \cos(n\pi)} = (-1)^n.$$

W granicy $R \rightarrow \infty$ otrzymujemy zatem związek

$$2\pi i \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n g(n) = \oint_{\Gamma} dz h(z),$$

gdzie Γ jest zamkniętym konturem pokazanym w lewej części rysunku 15, a po zdeformowaniu Γ do konturu Γ'

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n g(n) = - \sum_i \operatorname{res} h(z) \Big|_{z=z_i \neq n}.$$

Suma obejmuje tu punkty osobliwe funkcji $h(z)$ nieleżące na osi rzeczywistej. W przypadku szeregu tu rozpatrywanego residua, które należy uwzględnić znajdują się w punktach $z_1 = i|a|$ oraz $z_2 = -i|a|$:

$$\sum \operatorname{res} h(z) \Big|_{z=\pm i|a|} = \frac{\pi}{2i|a| \sin(i\pi|a|)} + \frac{\pi}{-2i|a| \sin(-i\pi|a|)} = -\frac{\pi}{a \operatorname{sh}(\pi a)},$$

a zatem

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2 + a^2} = \frac{\pi}{a \operatorname{sh}(\pi a)}.$$

Konieczne do uzasadnienia wzorów szacowanie całek po bokach prostokąta z rysunku 16 postępuje analogicznie do szacowania przedstawionego przy sumowaniu szeregu $1/n^2$. Dla $z = x + iy$ mamy teraz

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{\sin \pi z} \right| &= \frac{1}{|\sin(\pi x) \operatorname{ch}(\pi y) + i \cos(\pi x) \operatorname{sh}(\pi y)|} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\pi x) \operatorname{ch}^2(\pi y) + \cos^2(\pi x) \operatorname{sh}^2(\pi y)}}. \end{aligned}$$

Na bokach pionowych, na których $x = \pm n + \frac{1}{2}$ redukuje się to do

$$\left| \frac{1}{\sin \pi z} \right| = \frac{1}{\operatorname{ch}(\pi y)} < 1,$$

a na bokach poziomych czynnik

$$\left| \frac{1}{\sin \pi z} \right| = \frac{1/\operatorname{ch}^2(\pi y)}{\sqrt{\sin^2(\pi x) + i \cos^2(\pi x) \operatorname{th}^2(\pi y)}}$$

jest (gdy $|y| \rightarrow \infty$, tj. $m \rightarrow \infty$) ograniczony. Reszta szacowania przebiega bez zmian.

Szereg $(-1)^n/n^2$ można zsumować tak jak szereg $1/n^2$, tj. biorąc granicę

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} &= \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2 + a^2} - \frac{1}{a^2} \right) = \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left(\frac{\pi}{a \operatorname{sh}(\pi a)} - \frac{1}{a^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left(\frac{1}{a^2(1 + \frac{1}{6}\pi^2 a^2 + \dots)} - \frac{1}{a^2} \right) = -\frac{\pi^2}{12}. \end{aligned}$$

Ten sam wynik można także uzyskać z sumy szeregu $1/n^2$:

$$\frac{\pi^2}{6} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}.$$

Zatem sumy odwrotnych kwadratów liczb nieparzystych i parzystych wynoszą odpowiednio

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} = \frac{\pi^2}{6} - \frac{1}{4} \frac{\pi^2}{6} = \frac{\pi^2}{8}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)^2} = \frac{\pi^2}{6} - \frac{\pi^2}{8} = \frac{\pi^2}{24}.$$

Stąd zaś

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)^2} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} = \frac{\pi^2}{24} - \frac{\pi^2}{8} = -\frac{\pi^2}{12}.$$

Zadanie

Zsumować szereg

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n}{(2n-1)^3}.$$

Rozwiązanie: Na pozór jest tu problem, gdyż wszystkie bieguny funkcji

$$f(z) = \pi \operatorname{ctg}(\pi z) \frac{z}{(2z-1)^3},$$

(również te, które są w punktach innych niż $z = n$) leżą na osi rzeczywistej, czyli poza konturem Γ' z rysunku 15. Problem ten można bez kłopotu obejść sumując szereg

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n}{(2n-1-ia)^3},$$

i biorąc granicę $a \rightarrow 0$. Ponieważ granica ta jest nieosobliwa, można po prostu od razu położyć $a = 0$.

Wykorzystując zatem wzory z poprzednich zadań (tak jak i tam można sprawdzić, że w granicy znikają całki po dużych półokręgach) mamy

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n}{(2n-1)^3} = -\operatorname{res} \frac{\pi z \operatorname{ctg}(\pi z)}{(2z-1)^3} \Big|_{z=\frac{1}{2}}.$$

Biegun w $z = \frac{1}{2}$ jest trzeciego rzędu, więc

$$\begin{aligned} \operatorname{res} \left(\frac{\pi z \operatorname{ctg}(\pi z)}{(2z-1)^3} \right) \Big|_{z=\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left[\frac{d^2}{dz^2} \left(\frac{1}{8} \pi z \operatorname{ctg}(\pi z) \right) \right]_{z=\frac{1}{2}} \\ &= \frac{\pi^2}{16} \left[\frac{d^2}{d\eta^2} \eta \operatorname{ctg} \eta \right]_{\eta=\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi^2}{16} \left[\frac{d}{d\eta} \left(\operatorname{ctg} \eta - \frac{\eta}{\sin^2 \eta} \right) \right]_{\eta=\frac{\pi}{2}} \\ &= \frac{\pi^2}{16} \left[\frac{-2}{\sin^2 \eta} + \frac{2\eta \cos \eta}{\sin^3 \eta} \right]_{\eta=\frac{\pi}{2}} = -\frac{\pi^2}{8}. \end{aligned}$$

Zatem

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n}{(2n-1)^3} = \frac{\pi^2}{8}.$$

Zadanie

Zsumować szereg

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n n}{4n^2 + 4n + 5}.$$

Rozwiązanie: Szereg ten jest zbieżny tylko warunkowo, ale metoda wciąż działa. Tworzymy funkcję

$$h(z) = \frac{1}{4} \frac{\pi z}{\sin(\pi z)} \frac{1}{z^2 + z + 5/4},$$

i mamy

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n n}{4n^2 + 4n + 5} = - \sum_{z_i \neq n} \operatorname{res} h(z)|_{z=z_i}.$$

Funkcja $h(z)$ ma poza osią rzeczywistą bieguny proste w $z_1 = -\frac{1}{2} + i$ oraz w $z_2 = -\frac{1}{2} - i$; residua w tych punktach obliczamy standardowo:

$$\begin{aligned} \operatorname{res} h(z)|_{z=z_1} &= \frac{1}{4} \frac{\pi z_1}{\sin(\pi z_1)} \frac{1}{z_1 - z_2} = \frac{\pi}{4} \frac{-\frac{1}{2} + i}{2i \sin\left(-\frac{\pi}{2} + i\pi\right)} = -\frac{\pi}{16} \frac{2 + i}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - i\pi\right)} \\ &= -\frac{\pi}{16} \frac{2 + i}{\cos(i\pi)} = -\frac{\pi}{16} \frac{2 + i}{\operatorname{ch}(\pi)}, \\ \operatorname{res} h(z)|_{z=z_2} &= \frac{1}{4} \frac{\pi z_2}{\sin(\pi z_2)} \frac{1}{z_2 - z_1} = \frac{\pi}{4} \frac{-\frac{1}{2} - i}{-2i \sin\left(-\frac{\pi}{2} - i\pi\right)} = -\frac{\pi}{16} \frac{2 - i}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + i\pi\right)} \\ &= -\frac{\pi}{16} \frac{2 - i}{\cos(i\pi)} = -\frac{\pi}{16} \frac{2 - i}{\operatorname{ch}(\pi)}. \end{aligned}$$

Zatem

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n n}{4n^2 + 4n + 5} = \frac{\pi}{4 \operatorname{ch} \pi}.$$

Zadanie

Posługując się twierdzeniem o residuach zsumować szereg

$$S = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^4 + a^4}.$$

Wykorzystać wynik, by podać sumę szeregu

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4}.$$

Rozwiązanie: Szereg jest bezwzględnie zbieżny. Postępujemy standardowo: tworzymy funkcję

$$f(z) = \pi \operatorname{ctg}(\pi z) g(z),$$

w której $g(z) = 1/(z^4 + a^4)$, mającą poza osią rzeczywistą bieguny proste w punktach, w których bieguny proste ma funkcja $g(z)$, tj. w punktach

$$z_1 = -z_4 = \frac{-1+i}{\sqrt{2}}|a|, \quad z_2 = -z_3 = \frac{1+i}{\sqrt{2}}|a|.$$

Residua funkcji $g(z)$ znajdujemy wykorzystując związki $z_1^2 = z_4^2 = -ia^2$, $z_2^2 = z_3^2 = ia^2$, oraz

$$\begin{aligned} (z - z_1)(z - z_2) &= z^2 - i\sqrt{2}|a|z - a^2, \\ (z - z_3)(z - z_4) &= z^2 + i\sqrt{2}|a|z - a^2. \end{aligned}$$

Są one równe

$$\begin{aligned} \operatorname{res} g(z)|_{z=z_1} &= \frac{1}{2\sqrt{2}|a|^3(1+i)}, & \operatorname{res} g(z)|_{z=z_2} &= \frac{1}{-2\sqrt{2}|a|^3(1-i)}, \\ \operatorname{res} g(z)|_{z=z_3} &= \frac{1}{2\sqrt{2}|a|^3(1-i)}, & \operatorname{res} g(z)|_{z=z_4} &= \frac{1}{-2\sqrt{2}|a|^3(1+i)}. \end{aligned}$$

Ponadto, wprowadzając oznaczenia $c \equiv \cos \alpha$, $s \equiv \sin \alpha$ oraz $c_h \equiv \operatorname{ch} \alpha$, $s_h \equiv \operatorname{sh} \alpha$, gdzie $\alpha \equiv \pi|a|/\sqrt{2}$, mamy

$$\operatorname{ctg} z_1 = -\operatorname{ctg} z_4 = \frac{c c_h + i s s_h}{-s c_h + i c s_h}, \quad \operatorname{ctg} z_2 = -\operatorname{ctg} z_3 = \frac{c c_h - i s s_h}{s c_h + i c s_h}.$$

Zgodnie ze wzorem podstawowym na sumowanie szeregów mamy

$$\begin{aligned} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^4 + a^4} &= -\frac{\pi}{2\sqrt{2}|a|^3} 2 \left\{ \frac{c c_h + i s s_h}{(1+i)(-s c_h + i c s_h)} - \frac{c c_h - i s s_h}{(1-i)(s c_h + i c s_h)} \right\} \\ &= -\frac{\pi}{2\sqrt{2}|a|^3} \frac{1}{s^2 c_h^2 + c^2 s_h^2} \{ (1-i)(-s c_h - i c s_h)(c c_h + i s s_h) \\ &\quad - (1+i)(s c_h - i c s_h)(c c_h - i s s_h) \}. \end{aligned}$$

Po wymnożeniu wszystkie wyrazy urojone redukują się i otrzymujemy

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^4 + a^4} = \frac{\pi}{\sqrt{2}|a|^3} \frac{s c + s_h c_h}{s^2 c_h^2 + c^2 s_h^2}.$$

Sumę szeregu $1/n^4$ otrzymujemy biorąc granicę

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{1}{2} \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^4 + a^4} - \frac{1}{a^4} \right) = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\pi}{2\sqrt{2}|a|^3} \left(\frac{s c + s_h c_h}{s^2 c_h^2 + c^2 s_h^2} - \frac{1}{\alpha} \right).$$

Pracowicie rozwijamy zatem wykorzystując najpierw w mianowniku “jedynekę hiperboliczną” i “jedynekę trygonometryczną”

$$\begin{aligned}\frac{s c + s_h c_h}{s^2 c_h^2 + c^2 s_h^2} - \frac{1}{\alpha} &= \frac{s c + s_h c_h}{1 - c^2 + s_h^2} - \frac{1}{\alpha} = \frac{2\alpha \left(1 + \frac{2}{15}\alpha^4 + \dots\right)}{2\alpha^2 \left(1 + \frac{2}{45}\alpha^4 + \dots\right)} - \frac{1}{\alpha} \\ &= \frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{2}{15}\alpha^4 + \dots\right) \left(1 - \frac{2}{45}\alpha^4 + \dots\right) - \frac{1}{\alpha} = \frac{4}{45}\alpha^3 + \mathcal{O}(\alpha^5).\end{aligned}$$

Stąd

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{1}{2} \lim_{a \rightarrow 0} \left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right)^4 \frac{1}{\alpha^3} \left\{ \frac{4}{45}\alpha^3 + \mathcal{O}(\alpha^5) \right\} = \frac{\pi^4}{90}.$$

Wykorzystując uzyskany wzór możemy napisać

$$\frac{\pi^4}{90} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)^4} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^4} = \frac{1}{16} \frac{\pi^4}{90} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^4},$$

co pozwala napisać wzory na szeregi odwrotnych czwartych potęg nieparzystych i parzystych liczb naturalnych:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^4} = \frac{\pi^4}{90} - \frac{1}{16} \frac{\pi^4}{90} = \frac{\pi^4}{96}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)^4} = \frac{\pi^4}{90} - \frac{\pi^4}{96} = \frac{\pi^4}{1440}.$$

A stąd już bez skomplikowanego całkowania przez residua mamy

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^4} = -\frac{\pi^4}{90} + \frac{1}{16} \frac{\pi^4}{90} + \frac{\pi^4}{90} - \frac{\pi^4}{96} = -\frac{7\pi^4}{720}.$$

Zadanie

Udowodnić wzorek Langevine'a

$$\sin \theta = \theta \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\theta^2}{n^2 \pi^2} \right).$$

Rozwiązanie: Wzorek ten, jeśli prawdziwy, jest przedłużeniem analitycznym ($\theta \rightarrow ix$) wzoru

$$\frac{\operatorname{sh} x}{x} = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{x^2}{n^2 \pi^2} \right).$$

Logarytmując powyższy związek stronami mamy

$$\ln \left(\frac{\operatorname{sh} x}{x} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \ln \left(\frac{x^2 + n^2 \pi^2}{n^2 \pi^2} \right).$$

Obliczając następnie pochodne po x obu stron otrzymujemy związek

$$\operatorname{cth} x - \frac{1}{x} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2x}{x^2 + n^2 \pi^2} = \frac{2x}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + (x/\pi)^2}.$$

Wykorzystując znaleziony już wzór na sumę szeregu $1/(n^2 + a^2)$:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + a^2} = \frac{1}{2} \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2 + a^2} - \frac{1}{a^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{a} \operatorname{cth}(\pi a) - \frac{1}{a^2} \right),$$

widzimy, że ($a = x/\pi$) prawa strona tego związku jest równa

$$\frac{2x}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + (x/\pi)^2} = \frac{2x}{\pi^2} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi^2}{x} \operatorname{cth} x - \frac{\pi^2}{x^2} \right) = \operatorname{cth} x - \frac{1}{x}.$$

c.b.d.o.