

Uniwersytet Wrocławski, Instytut Informatyki
Studia stacjonarne I stopnia na kierunku Informatyka
Przedmiot obowiązkowy w semestrze zimowym pierwszego roku studiów
30 godzin wykładu + 30 godzin repetytorium + 30 godzin ćwiczeń

Logika dla informatyków

Materiały do zajęć

Wrocław, 2022

2022/23

Właściciel tej kopii notatek

Rok akad.

Uwaga: W niniejszej książeczce zebrano listy zadań, notatki do wykładów oraz inne materiały przygotowywane do zajęć z *Logiki dla informatyków* w latach 1997–2022. Mimo iż materiały te posiadają bardziej dopracowaną formę, niż przygotowywane do innych zajęć kserograficzne kopie oraz zostały oddane do druku i oprawy, jednak nie były poddane — jak to ma miejsce w przypadku podręczników — solidnej korekcie i zawierają sporo błędów. Nie zamieszczono w nich także szczegółowych wyjaśnień i komentarzy. Dlatego notatki te *nie są podręcznikiem do wykładu*. Mają jedynie służyć jako wykaz zagadnień obowiązujących do egzaminu i lista zadań przerabianych na ćwiczeniach. Przegląd zalecanych do zajęć podręczników jest zamieszczony na stronie [xi](#).

Podczas redagowania notatek wykorzystano:

- skrypt J. Tiuryna *Wstęp do teorii mnogości i logiki*
- listy zadań M. Zakrzewskiego
- materiały K. Apta, A. Kościelskiego, K. Matuszewskiego, P. Urzyczyna i T. Wierzbickiego
- podręczniki wymienione w bibliografii na stronie [xi](#)

Manuskrypt: W. Charatonik i L. Pacholski

Redakcja i skład: W. Charatonik i T. Wierzbicki

Konsultacja merytoryczna: A. Kościelski

Wydanie dwudzieste, poprawione

Niniejsze notatki mogą być drukowane, powielane oraz rozpowszechniane w wersji elektronicznej i papierowej, w części bądź w całości — bez konieczności uzyskania zgody autora — pod warunkiem nieosiągania bezpośrednich korzyści finansowych z ich rozpowszechniania i z zachowaniem praw autorskich. W szczególności dodatkowe egzemplarze mogą być sprzedawane przez osoby trzecie jedynie po cenie uzyskania kopii (druku, wydruku, kserografowania itp.)

Data utworzenia dokumentu: 20 września 2022

Szanowni Państwo,

Program wykładu logiki dla informatyków nie jest trudny — w następnych semestrach będziecie Państwo słuchali dużo trudniejszych wykładów. Mimo to co roku znaczna część studentów nie zdaje egzaminu z logiki.

Jednym z powodów niepowodzenia na egzaminie jest to, że jest to dla Was pierwszy w życiu wykład akademicki, w którym pojawia się duża liczba nowych pojęć. Pojęcia te, na ogół dosyć abstrakcyjne, pojawiają się licznie na każdych zajęciach. Trzeba się ich wszystkich nauczyć. Nauczyć — to mało, gdyż matematyka nie polega na wykonywaniu mniej lub bardziej skomplikowanych rachunków, lecz na przeprowadzaniu rozumowań. Dlatego jest bardzo ważne, byście nie tylko je znali, ale i dobrze rozumieli. Wykład ma Wam w tym pomóc, ale wielu z Was nie zdoła na samym wykładzie opanować całego materiału. Na wykładzie nie nauczycie się też sprawnie posługiwać wprowadzonymi pojęciami. Dlatego musicie systematycznie pracować w domu. Jeśli przed zajęciami przypomnicie sobie wcześniej wprowadzone definicje, zwiększycie swoje szanse na zrozumienie nowego materiału. Jeśli natomiast nie będziecie znać wcześniej wprowadzonych pojęć, będziecie z dużym prawdopodobieństwem siedzieć na wykładzie, jak na tureckim kazaniu. Jeżeli przyswojenie nowych pojęć sprawia Wam trudność, radzę także przed wykładem przejrzeć podane w przygotowanych przez nas notatkach definicje, które dopiero zostaną na zajęciach wprowadzone. Być może czytając je po raz pierwszy przed wykładem nie potraficie ich w pełni zrozumieć, ale gdy je wcześniej przeczytacie, wyniesiecie z wykładu znacznie więcej. Poza tym będziecie przed zajęciami wiedzieć, czego nie rozumiecie i o co na wykładzie zapytać.

Od wielu lat wszystkim studentom zaczynającym studia powtarzamy to, co napisaliśmy w poprzednim paragrafie. Niestety z marnym skutkiem. Co roku w drugiej połowie semestru okazuje się, że znaczna część studentów nie rozumie wykładu, bo nie pamięta wcześniej wprowadzonych definicji i nie zna treści udowodnionych wcześniej twierdzeń. Co roku około połowy studentów nie zalicza tego przedmiotu. Bardzo nas to martwi. Chcielibyśmy, aby znaczna większość z Was mogła ukończyć studia. Dlatego aby Was zdyscyplinować i zmusić do systematycznej pracy wprowadzamy opisane w regulaminie zajęć rygory (punktowy system zaliczania ćwiczeń, kartkówki, kolokwia itd.). Ich celem nie jest uprzykrzenie Wam życia, ale zwiększenie szansy na to, że zdacie egzamin.

Wykładowcy

Spis treści

A. Informacje ogólne	ix
A.1. Zapisy na zajęcia	ix
A.2. Obsada zajęć i konsultacje	ix
B. Literatura	xi
C. Zasady prowadzenia i zaliczania ćwiczeń	xiii
C.1. Wstęp	xiii
C.2. Szczegółowe zasady prowadzenia zajęć	xiv
C.3. Szczegółowe zasady zaliczania ćwiczeń	xvii
D. Egzaminy	xix
D.1. Egzamin końcowy	xx
D.2. Egzamin poprawkowy	xxi
0. Zadania na dobry początek	1
1. Indukcja matematyczna	5
2. Rachunek zdań	13
2.1. Składnia rachunku zdań	13
2.2. Wartości logiczne i znaczenie formuł zdaniowych	14
2.2.1. Metoda zero-jedynkowa	16
2.2.2. Skrócona metoda zero-jedynkowa	16
2.2.3. Równoważność formuł	21
2.2.4. Lemat o podstawianiu	23
2.3. Formalizacja rozumowań w języku rachunku zdań	25
2.4. Własności formuł zdaniowych	26
2.5. Postaci normalne formuł zdaniowych	33
2.5.1. Usuwanie symbolu negacji	33

2.5.2.	Dysjunkcyjna postać normalna	36
2.5.3.	Koniunkcyjna postać normalna	37
2.6.	Funkcje boolowskie i zupełne zbiory spójników	39
2.7.	Rezolucja dla rachunku zdań	41
2.8.	Funkcje boolowskie i układy elektroniczne	43
2.9.	System dedukcji naturalnej dla rachunku zdań	45
3.	Rachunek kwantyfikatorów	51
3.1.	Składnia rachunku kwantyfikatorów	51
3.2.	Znaczenie formuł rachunku kwantyfikatorów	53
3.3.	System dedukcji naturalnej dla rachunku kwantyfikatorów	54
3.4.	Formalizacja wypowiedzi w języku rachunku kwantyfikatorów	58
4.	Zbiory	63
4.1.	Działania na zbiorach	64
4.2.	Operacje nieskończone na zbiorach	70
5.	Relacje	77
5.1.	Para uporządkowana i iloczyn (produkt) kartezjański	77
5.2.	Relacje	78
5.3.	Krotki (n -tki) uporządkowane i relacje n -argumentowe	81
5.4.	Złożenie relacji. Relacja odwrotna	81
5.5.	Relacyjny rachunek dziedzin	84
6.	Funkcje	87
6.1.	Funkcje odwrotne i złożenie funkcji	88
6.2.	Obraz i przeciwobraz zbioru	89
7.	Relacje równoważności	93
8.	Teoria mocy	101
8.1.	Równoliczność zbiorów	101
8.2.	Własności pojęcia równoliczności zbiorów	103
8.3.	Zbiory skończone	103
8.3.1.	Wzór włączeń i wyłączeń	106
8.4.	Moce zbiorów nieskończonych	107
8.5.	Wyznaczanie mocy zbiorów	111
8.6.	Zbiory przeliczalne	113
8.7.	Paradoks niedźwiedzi	117

9. Relacje porządku	119
9.1. Przykłady porządków	120
9.2. Elementy wyróżnione	124
9.3. Izomorfizm porządkowy	125
9.4. Zawieranie zbiorów jako relacja porządku	128
9.5. Liczba relacji porządku	129
10. Kresy zbiorów	131
10.1. Kraty	133
10.2. Porządki zupełne	134
10.3. Twierdzenia o punkcie stałym	136
10.4. Relacje w zbiorze formuł zdaniowych	137
11. Dobre porządki i indukcja	139
11.1. Porządki regularne	139
11.2. Indukcja	142
12. Algebra termów	147
12.1. Podstawienia	147
12.2. Problem unifikacji	148
13. Elementy logiki formalnej	151
13.1. Semantyka języka pierwszego rzędu	151
13.2. Podstawienia	153
13.3. Rezolucja dla rachunku I rzędu	153



Informacje ogólne

Logika dla Informatyków jest przedmiotem obowiązkowym na pierwszym semestrze studiów informatycznych I stopnia na Uniwersytecie Wrocławskim. W roku akademickim 2019/20 logika uzyskała szczególny status: jest to jedyny przedmiot, którego nie można na tych studiach powtarzać.

A.1. Zapisy na zajęcia

Na zajęcia należy się zapisać w internetowym systemie *Zapisy*, dostępnym pod adresem <https://zapisy.ii.uni.wroc.pl>. Zadeklarowanie przedmiotu w systemie *Zapisy* jest formą umowy pomiędzy studentem i uczelnią. Student zobowiązuje się uczęszczać na zajęcia, uczelnia zaś zobowiązuje się je prowadzić i ocenić studenta po ich zakończeniu. Dlatego do egzaminu będą mogły przystąpić jedynie osoby zapisane na wykład, a zaliczenie ćwiczeń będą mogły uzyskać jedynie osoby zapisane na ćwiczenia.

Oprócz systemu *Zapisy* w trakcie zajęć będziemy korzystać z *Systemu Komunikacji na Odległość ze Studentami (SKOS)* pod adresem <https://skos.ii.uni.wroc.pl>, gdzie będą ogłaszane listy zadań i inne materiały dla studentów (w tym informacje o sprawdzianach, egzaminach, konsultacjach itp) oraz z *Uczelnianego Systemu Obsługi Studiów (USOSweb)* pod adresem <https://usosweb.uni.wroc.pl>, gdzie będzie prowadzona punktacja ćwiczeń.

A.2. Obsada zajęć i konsultacje

Obsada zajęć dydaktycznych w danym roku akademickim jest dostępna w systemie *Zapisy*.

Każdy student ma niepodważalne prawo do bezpośredniej rozmowy z prowadzącymi na temat zajęć, w których uczestniczy. Uważamy, że z takich spotkań, tj. *konsultacji*, studenci korzystają nawet zbyt mało. Serdecznie zapraszając na konsultacje mamy jednak prośbę, by przestrzegać ustalonych przez prowadzących zasad. Każdy pracownik dydaktyczny wyznacza dwie godziny w tygodniu, w czasie których jest

do dyspozycji studentów. Poszczególni prowadzący ustalają także inne sposoby konsultacji. Pracownicy spędzają w Instytucie znacznie więcej czasu, niż podane dwie godziny, ale poza dydaktyką wykonują też wiele innych prac. Dlatego prosimy traktować ze zrozumieniem ogłoszenia typu „proszę studentów o nieprzychodzenie poza godzinami konsultacji”. Prośba o respektowanie podanych terminów dotyczy szczególnie spraw technicznych, takich jak reklamacje dotyczące rankingu. Studentów zapisanych na przedmiot jest ponad stu, a prowadzący — jeden. Nie chcemy, żeby studenci odnieśli wrażenie, że prowadzący starają się od nich izolować. Chodzi tylko o to, by nasze kontakty z dużą liczbą studentów przebiegały sprawnie i nie dezorganizowały naszej pracy w Instytucie.

Godziny konsultacji można znaleźć m. in. na stronach domowych prowadzących oraz w systemie *Zapisy*.

Po zajęciach prowadzący będą uzupełniać w systemie *USOSweb* punktację ćwiczeń służącą do wyliczenia ocen końcowych. Problemy techniczne dotyczące punktacji za zadania, sprawdziany i kartkówki należy wyjaśniać z osobą, która danego dnia prowadziła ćwiczenia, osobiście w czasie jej konsultacji lub za pośrednictwem poczty elektronicznej, nie później niż trzy tygodnie po ćwiczeniach. W początkowym okresie (mniej więcej pierwsze dwa tygodnie semestru) system *USOSweb* nie ma jeszcze wystarczających informacji o studentach zapisanych na przedmiot; w tym czasie punktacja nie jest dostępna.

B

Literatura

Spośród licznych podręczników dostępnych w bibliotekach i księgarniach warto wymienić (wszystkie poniższe książki są dostępne w bibliotece wydziałowej):

1. Jerzy Tiurnyn, *Wstęp do teorii mnogości i logiki*. Skrypt można wypożyczyć w bibliotece wydziałowej. Wersja elektroniczna jest dostępna na stronie wykładu.
2. Wojciech Guzicki, Piotr Zakrzewski, *Wykłady ze wstępu do matematyki. Wprowadzenie do teorii mnogości oraz Wstęp do matematyki. Zbiór zadań*, PWN, Warszawa, 2005.
3. Kazimierz Kuratowski, *Wstęp do teorii mnogości i topologii*, PWN, Warszawa, 1982. Krótkie wprowadzenie do teorii mnogości.
4. Kazimierz Kuratowski, Andrzej Mostowski, *Teoria mnogości*, PWN, Warszawa, 1978. Obszerny wykład teorii mnogości.
5. Wiktor Marek, Janusz Onyszkiewicz, *Elementy logiki i teorii mnogości w zadaniach*, PWN, Warszawa, 2000. Obszerny zbiór prostych, typowych zadań.
6. Helena Rasiowa, *Wstęp do matematyki współczesnej*, PWN, Warszawa, 1999. Klasyczny podręcznik podstaw logiki i teorii mnogości.
7. Kenneth A. Ross, Charles R. B. Wright, *Matematyka dyskretna*, PWN, Warszawa, 1986. Wbrew tytułowi książka zawiera sporo elementarnie wyłożonego materiału z logiki i teorii mnogości. Oryginał angielski: *Discrete Mathematics*, Prentice Hall, 1988.
8. Jerzy Słupecki, Ludwik Borkowski, *Elementy logiki matematycznej i teorii mnogości*, PWN, Warszawa, 1963.
9. Michael Huth, Mark Ryan, *Logic in computer science*, Cambridge University Press, 2004.

10. Susanna S. Epp, *Discrete mathematics with applications*, Brooks/Cole, 2011.
11. Keith Devlin, *Myślenie matematyczne. Twój nowy sposób pojmowania świata*, Helion, 2019.

C

Zasady prowadzenia i zaliczania ćwiczeń

Poniższy regulamin dotyczy jedynie zajęć w grupach podstawowych i nie obejmuje grup specjalnych, w szczególności grupy zaawansowanej. Regulamin ten zakłada, że zajęcia będą się odbywać w formie stacjonarnej; w przypadku zmian reżimu sanitarnego zasady prowadzenia zajęć i progi punktowe mogą się zmienić. O szczegółach tych zmian będziemy informować na bieżąco w systemie SKOS. W chwili drukowania skryptu przewidujemy jedynie, że w przypadku konieczności przejścia na zdalne nauczanie przeniesiemy nacisk z prezentacji ustnych przy tablicy na pisemne prace domowe.

C.1. Wstęp

Zasadniczym celem ćwiczeń z przedmiotu *Logika dla informatyków* jest ułatwienie studentom samodzielnej pracy nad opanowaniem materiału w czasie *całego semestru*. Ocena z ćwiczeń jest oceną jakości i intensywności pracy studenta w trakcie semestru, w odróżnieniu od egzaminu z przedmiotu *Logika dla informatyków*, który ocenia stan wiedzy studenta w chwili zakończenia semestru.

Wykładowca ogłasza z odpowiednim wyprzedzeniem numery zadań z niniejszego zbioru. Studenci rozwiązują podane zadania *samodzielnie w domu*. Jeżeli student ma wątpliwości i chciałby je skonsultować z prowadzącym, powinien to uczynić w czasie godzin konsultacji prowadzącego. Zakłada się przy tym, że studenci będą dążyć do pewnej samodzielności w pracy nad opanowaniem przedmiotu. Mimo że zachęcamy studentów do wspólnej nauki, stanowczo odradzamy metodę polegającą na słuchaniu rozwiązań prezentowanych przez innych (np. starszych kolegów) lub szukaniu ich w internecie i uczeniu się ich na pamięć. Metoda taka nie może dać dobrych rezultatów, podobnie jak nie można nauczyć się grać na fortepianie tylko słuchając koncertów.

Podstawą do wystawienia oceny jest liczba zadań, które student rozwiązał w trak-

cie całego semestru i, pomijając wyjątkowe przypadki, ocena zależy w sposób liniowy od tej liczby. Prowadzący spotyka się ze studentami regularnie na ćwiczeniach, aby ustalić faktyczną liczbę zadań rozwiązanych przez każdego studenta. Dlatego pomimo iż na zajęciach powinna panować swobodna atmosfera, nie należy zapominać, że każde ćwiczenie są w istocie *sprawdzianem* wiedzy studentów. Prezentowanie rozwiązań na tablicy całej grupie studentów ma także walor dydaktyczny, pozwala bowiem osobom które nie poradziły sobie z zadaniem na poznanie jego wzorcowego rozwiązania (z określonych niżej zasad szczegółowych wynika, że rozwiązanie powinni prezentować jedynie studenci dobrze przygotowani). Trzeba przy tym pamiętać, że rozwiązania powinny być prezentowane przez *studentów*. O ile dopuszcza się możliwość prezentowania pojedynczych rozwiązań przez prowadzącego, zajęcia zdominowane przez taką formę przyjmowane są z niechęcią.

Numery zadań obowiązujących na następny tydzień są ogłaszane w systemie **SKOS**. Począwszy od około trzeciego tygodnia semestru w systemie **USOSweb** jest prowadzona punktacja ćwiczeń zawierająca zestawienie aktualnie zdobytej liczby punktów przez każdego studenta i prognozę oceny końcowej. Po zakończeniu semestru zawiera ona ostateczne wyniki ćwiczeń. We wszelkich sprawach dotyczących liczby zdobytych punktów studenci winni zgłaszać się do osoby prowadzącej zajęcia w danym dniu.

Na każdą z około 28 godzin zajęć zadaje się przeciętnie 3 zadania, zatem w ciągu całego semestru będzie ich około 84. Niniejsze notatki zawierają o kilkaset zadań więcej, a więc spory nadmiar. Bardzo zachęcamy studentów do rozwiązywania także pozostałych zadań.

Pierwsze ćwiczenia w semestrze nie są punktowane. Na zajęciach są rozwiązywane zadania z rozdziału 0 niniejszych notatek.

C.2. Szczegółowe zasady prowadzenia zajęć

1. Co najmniej na trzy dni (zwykle na tydzień) przed zajęciami na stronie WWW wykładu jest ogłaszana lista numerów zadań z niniejszego zbioru. Część zadań jest oznaczona gwiazdką. Na ćwiczeniach są rozwiązywane wybrane zadania z tej listy. Prowadzącemu pozostawia się decyzję odnośnie wyboru zadań do rozwiązania.
2. Przed rozpoczęciem zajęć student wypełnia kupon wpisując numery zadań z listy, które potrafi rozwiązać.¹ Kartka powinna być wypełniona czytelnie, zawierać datę, jednoznacznie wpisane numery zadań², liczby punktów za poszczególne zadania, sumę punktów oraz imię i nazwisko studenta. Bezpośrednio po wejściu do sali ćwiczeniowej prowadzący zajęcia zbiera kupony. *Gdy*

¹ Gotowe kupony można wyciąć z ostatnich stron niniejszej książeczki.

² Niedopuszczalne są sformułowania typu „pierwsza część zadania 7” itp. Zadanie jest niepodzielna całością a deklaracja studenta powinna być jednoznaczna: tak lub nie.

prowadzący przychodzi do sali ćwiczeniowej, kupony powinny być już wypełnione przez studentów tak, by mogły być natychmiast zebrane i by prowadzący nie musiał opóźniać rozpoczęcia zajęć oczekując na wypełnienie kuponów.

3. Po rozpoczęciu zajęć dokonywanie jakichkolwiek zmian w treści złożonych deklaracji³ jest niemożliwe.
4. Na każdych zajęciach student zdobywa liczbę punktów równą liczbie zadań, które zgłosił do rozwiązania z listy przewidzianej na dane zajęcia, z wyjątkiem przypadków opisanych w punktach 10–12.
5. Student nieobecny na zajęciach nie otrzymuje punktów. Poza przypadkami długotrwałej (trwającej co najmniej trzy tygodnie) choroby poświadczonej zwolnieniem lekarskim nie można odzyskać utraconych w ten sposób punktów.
6. Rozwiązanie danego zadania na tablicy przedstawia jedna z osób, wybrana przez prowadzącego, która zgłosiła gotowość rozwiązania tego zadania.⁴ Prowadzący ma prawo przerwać osobie referującej w dowolnym momencie i poprosić inne osoby, które zgłosiły gotowość rozwiązania danego zadania, o kontynuowanie.⁵
7. Osoba przedstawiająca rozwiązanie musi znać i rozumieć definicje wszystkich pojęć, których używa w rozwiązaniu; nieznanostwo lub niezrozumienie definicji jakiegokolwiek używanego pojęcia są traktowane jak błąd w rozwiązaniu. Osoba ta musi być także przygotowana na niewielkie zmiany w treści zadania.⁶
8. W ciągu semestru odbędą się trzy kolokwia punktowane od 0 do 25 punktów. Każdy student otrzyma punkty za dwa najlepiej napisane z tych trzech kolokwium. Nie będzie kolokwium poprawkowych. Również w przypadku usprawiedliwionej nieobecności na którymś z kolokwium nie będzie możliwości poprawienia wyniku.
9. Student powinien znać definicje wprowadzanych na wykładzie pojęć i sformułowania podstawowych twierdzeń. Oczekujemy, że przed każdym wykładem

³Np. prośby o wycofanie lub dopisanie jakiegoś zadania.

⁴Niniejsze regulacje nie ustalają sposobu wyboru tej osoby. Może on być dokonany losowo. Prowadzący może też np. częściej wybierać osoby, które w przeszłości nie poradziły sobie, mimo zadeklarowanej chęci, z rozwiązaniem zadania na tablicy. Może również przedstawić rozwiązanie tego zadania samodzielnie albo pozostawić to rozwiązanie ochotnikowi.

⁵Niniejsze regulacje nie precyzują postępowania w sytuacji, gdy następna osoba stwierdzi, że jej sposób rozumowania jest zupełnie inny. Może wówczas np. rozpocząć referowanie rozwiązania od początku. Decyzja należy do prowadzącego.

⁶Ma to na celu zapobieganie dość powszechnym wśród studentów praktykom uczenia się na pamięć rozwiązań bez ich zrozumienia. W świetle tej regulacji np. zadania 39 i 40 są tym samym zadaniem i wobec studenta, który zgłasza jedno z nich a nie umie rozwiązać drugiego, mogą być zastosowane sankcje opisane w punktach 10 i 12.

i każdymi ćwiczeniami studenci będą przypominać sobie wcześniej poznany materiał. Aby ułatwić studentom systematyczne powtarzanie wcześniej poznanego materiału, w czasie semestru (na początku ćwiczeń lub zdalnie poza zajęciami) odbędzie się około jedenastu kartkówek. Będą one sprawdzać znajomość pojęć wprowadzanych na wykładzie oraz podstawowych faktów (według niniejszych notatek do wykładu) lub rozwiązywanych wcześniej zadań. Za poprawną odpowiedź na wszystkie pytania zadane w kartkówce można otrzymać 3 punkty, z tym że punkty otrzymuje się tylko za dziesięć najlepiej napisanych kartkówek.

10. Jeżeli podczas przedstawiania rozwiązania na tablicy okaże się, że student popełnił błąd (np. przeoczył trudność lub źle zrozumiał treść zadania) i nie jest w stanie rozwiązać poprawnie tego zadania, nie otrzymuje punktów za to zadanie i dodatkowo traci dwa punkty. W ciągu tygodnia od tego zdarzenia student może dostarczyć prowadzącemu, z którym miał w tym dniu zajęcia, pisemne rozwiązanie⁷ tego samego zadania, za które będzie mógł otrzymać od zera do trzech punktów.
11. Student rozwiązujący zadanie przy tablicy otrzymuje za nie dodatkowo od 0 do 2 punktów. Standardowo jest to 1 punkt; eleganckie i zrozumiałe dla słuchaczy rozwiązania nagradzane są 2 punktami; rozwiązania częściowe lub niezrozumiałe mogą nie być nagradzane. O liczbie przyznanych punktów decyduje prowadzący zajęcia.
12. Jeżeli okaże się, że student oświadczył nieprawdę i nie umie w ogóle rozwiązać zadania lub nawet nie rozumie jego treści, traci wszystkie punkty zdobyte danego dnia oraz dodatkowo 5 punktów.⁸
13. W ciągu semestru do rozwiązania zostaną przedstawione zadania o łącznej liczbie punktów nie mniejszej niż 84. Ponadto będzie można uzyskać 80 punktów za prace pisemne: 50 za kolokwia i 30 za kartkówki. Oznacza to, że łącznie można uzyskać co najmniej 164 punkty oraz kilka do kilkunastu punktów za rozwiązywanie zadań przy tablicy.
14. Ocena końcowa z ćwiczeń jest wystawiana na podstawie uzyskanych punktów, według zasad opisanych w następnym rozdziale i podsumowanych w tabeli C.1.

⁷Rozwiązanie musi być napisane odręcznie, w szczególności nie może być wydrukowane. Ma to na celu zapobieganie kopiowaniu gotowych rozwiązań od innych studentów.

⁸Z punktu widzenia interesów studenta okazuje się krytyczne rozróżnienie między tym punktem i punktem 10. Niestety, mimo jasnego sformułowania, chodzi tu o kwestię merytoryczną co do której podanie ścisłego algorytmu postępowania jest niemożliwe. Rozróżnienie to pozostaje do decyzji prowadzącego.

punkty	ocena
$\geq 70^*$	dst
$\geq 86^*$	dst+
$\geq 102^{*\dagger}$	db
$\geq 118^{*\dagger}$	db+
$\geq 134^{*\ddagger}$	bdb

* w tym 25 punktów za prace pisemne, 30 za ustne, 30 przed końcem roku

† w tym rozwiązanie przy tablicy co najmniej jednego zadania z gwiazdką

‡ w tym rozwiązanie przy tablicy co najmniej trzech zadań z gwiazdką

Tablica C.1: Sposób przeliczania liczby punktów na ocenę z ćwiczeń. Punkty bonusowe: patrz rozdział D.

- Ocena końcowa nie podlega poprawianiu po zakończeniu semestru. Nie ma kolokwiiw poprawkowych.⁹
- Studentci po zapisaniu się do grup ćwiczeniowych nie mogą ich zmieniać, nawet jeśli zajęcia odbywają się w tym samym czasie.
- Podczas referowania zadań przy tablicy student nie może mieć przy sobie notatek.

C.3. Szczegółowe zasady zaliczania ćwiczeń

Ocena z ćwiczeń wystawiana jest na podstawie sumy uzyskanych w ciągu semestru punktów według tabeli C.1. Aby zaliczyć ćwiczenia należy spełnić dodatkowe warunki:

- uzyskać co najmniej 30 punktów przed końcem roku kalendarzowego,
- uzyskać co najmniej 25 punktów za prace pisemne,
- uzyskać co najmniej 30 punktów za zgłoszone zadania.

Dodatkowo, aby otrzymać ocenę dobrą lub dobrą plus należy rozwiązać przy tablicy co najmniej jedno zadanie oznaczone gwiazdką. Do otrzymania oceny bardzo dobrej konieczne jest rozwiązanie przy tablicy co najmniej trzech takich zadań.

⁹Student powinien mieć świadomość, że zajęć można nie zaliczyć. W szczególności utrata punktów zgodnie z paragrafem 12 może jednoznacznie i nieodwołalnie skazać studenta na niezaliczenie zajęć i skreślenie z listy studentów.

D

Egzaminy

Poniższe zasady zakładają, że egzaminy odbędą się w formie stacjonarnej. Przewidujemy tylko, że w przypadku konieczności zdalnego przeprowadzenia egzaminów przyjmą one formę ustną, a o zmianach będziemy na bieżąco informować w systemie SKOS.

Oceną, jaką student otrzymuje z przedmiotu, jest wynik egzaminu zasadniczego. W razie otrzymania oceny niedostatecznej student ma prawo przystąpić do egzaminu poprawkowego. Każdy z tych egzaminów (końcowy i poprawkowy) składa się z dwóch części.

W razie przyłapania na ściąganiu podczas którejkolwiek części egzaminu student otrzymuje ocenę niedostateczną. Ocena ta jest ostateczna i nie podlega poprawianiu, a sprawa tego studenta jest kierowana do Dziekana.

Na egzamin należy przynieść przybory do pisania (pióro, długopis) i dowolny dokument ze zdjęciem w celu potwierdzenia tożsamości (dowód osobisty, paszport, legitymacja studencka itp.). Używanie notatek i własnego papieru jest niedozwolone. Wnoszenie toreb, wierzchnich okryć i wszelkich innych ruchomości na salę egzaminacyjną jest niedopuszczalne. Studenci powinni pozostawić je np. w szafkach w szatni. Strój odświętny na egzaminie nie jest wymagany.

Zarówno za egzamin zasadniczy, jak i poprawkowy można otrzymać od minus kilkunastu do 100 punktów. Punkty ujemne będą przyznawane za rozpoczęcie rozwiązywania zadania¹ oraz za umieszczenie w rozwiązaniu odpowiedzi kompromitująco fałszywych. Za brak rozwiązania zadania otrzymuje się 0 punktów. Liczba punktów możliwych do zdobycia na egzaminie może zostać zwiększona poprzez dodanie zadań bonusowych.

Do wyników egzaminu zasadniczego i poprawkowego dolicza się punkty bonusowe za zaliczenie ćwiczeń. Liczba punktów bonusowych jest częścią całkowitą ilorazu: $(C - 62)/16$, gdzie C oznacza całkowitą liczbę punktów uzyskanych na zali-

¹Ma to na celu eliminowanie odpowiedzi, w których nie ma w ogóle poprawnych rozumowań. Student oddając rozwiązanie zadania powinien być przekonany, że jest ono na tyle poprawne, że pozwoli mu przekroczyć próg 0 punktów.

punkty	ocena
$[-100 \div 18)$	ndst
$[18 \div 34)^*$	dst
$[34 \div 50)^*$	dst+
$[50 \div 66)^*$	db
$[66 \div 82)^*$	db+
$[82 \div +\infty)^*$	bdb

* Co najmniej 18 punktów należy uzyskać z pierwszej części.

Tablica D.2. Sposób przeliczania liczby punktów na ocenę z egzaminu.

czenie ćwiczeń w semestrze bezpośrednio poprzedzającym egzamin. Punkty z egzaminu zasadniczego i poprawkowego przeliczają się na oceny zgodnie z tablicą D.2.

Terminy egzaminów, miejsca ich przeprowadzenia, przydział studentów do sal, terminy ogłoszenia wyników oraz miejsca i terminy konsultacji poegzaminacyjnych są podane na stronie wykładu. Wszelkie wątpliwości dotyczące sposobu oceniania egzaminu i otrzymanych ocen studenci powinni wyjaśniać w trakcie konsultacji poegzaminacyjnych. Konsultacje dotyczące wyników egzaminów w innych terminach nie będą dokonywane.

Treść zadań egzaminacyjnych oraz wyniki egzaminów są ogłaszane na stronie wykładu po zakończeniu egzaminu.

D.1. Egzamin końcowy

Ocena z egzaminu końcowego jest wystawiana na podstawie sumy punktów uzyskanych na egzaminie i punktów bonusowych. Zakres materiału na egzaminie końcowym obejmuje cały semestr.

Do egzaminu końcowego mogą przystąpić jedynie osoby, które uzyskały zaliczenie ćwiczeń. Wszyscy studenci zapisani na przedmiot *Logika dla Informatyków*, którzy uzyskali zaliczenie ćwiczeń, mają obowiązek stawić się na ten egzamin.

Egzamin składa się z dwóch części oddzielonych krótką przerwą. Pierwsza część sprawdza podstawowe opanowanie materiału, natomiast druga sprawdza umiejętność twórczego posługiwania się nabytą wiedzą.

W razie nieobecności na egzaminie spowodowanej chorobą student ma obowiązek dostarczyć egzaminatorowi (osobiście, pocztą lub przez osoby trzecie) zwolnienie lekarskie w ciągu siedmiu dni licząc od dnia egzaminu. W szczególnych przypadkach decyzję o usprawiedliwieniu nieobecności na egzaminie może podjąć Dziekan lub Dyrektor Instytutu. W razie usprawiedliwionej nieobecności na egzaminie koń-

cowym egzaminator ustali dla danej osoby inny termin egzaminu w sesji zimowej (zwykle jest to pierwszy dzień roboczy po ustaniu przyczyny nieobecności).

Z pierwszej części egzaminu można zdobyć do 40 punktów. Osoby, które zdobędą co najmniej 18 punktów, będą mogły otrzymać (bez względu na wynik drugiej części) ocenę dostateczną z egzaminu końcowego. Ponadto osoby te będą mogły na pełnych prawach wziąć udział w drugiej części. Studenci, którzy w pierwszej części uzyskają mniej niż 18 punktów, otrzymają ocenę niedostateczną, a ich prace z drugiej części egzaminu końcowego nie będą sprawdzane.

D.2. Egzamin poprawkowy

W razie otrzymania oceny niedostatecznej z egzaminu zasadniczego student przystępuje do egzaminu poprawkowego w sesji poprawkowej. Ocena z egzaminu poprawkowego nie podlega poprawianiu.

Notacja matematyczna

Matematycy używają liter pochodzących z różnych krojów pisma i różnych alfabetów. Poniżej są zebrane alfabety użyte w niniejszych notatkach.

Pismo łaćńskie, gotyckie, blokowe i kaligraficzne

a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
α β γ δ ε ζ η θ ι κ λ μ ν ξ ο π ρ σ τ υ φ χ ψ ω
ⱥ ⱦ Ⱨ ⱨ Ⱪ ⱪ Ⱬ ⱬ Ɑ Ɱ Ɐ Ɒ ⱱ Ⱳ ⱳ ⱴ Ⱶ ⱶ ⱷ ⱸ ⱹ ⱺ ⱻ
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

Alfabet grecki

Niektóre małe litery greckie mają dwa warianty pisowni. Przeważnie używa się pierwszego z podanych.

<i>A</i>	<i>α</i>	alfa	<i>I</i>	<i>ι</i>	jota	<i>P</i>	<i>ρ, ϱ</i>	rho
<i>B</i>	<i>β</i>	beta	<i>K</i>	<i>κ</i>	kappa	<i>Σ</i>	<i>σ, ς</i>	sigma
<i>Γ</i>	<i>γ</i>	gamma	<i>Λ</i>	<i>λ</i>	lambda	<i>T</i>	<i>τ</i>	tau
<i>Δ</i>	<i>δ</i>	delta	<i>M</i>	<i>μ</i>	mi	<i>Υ</i>	<i>υ</i>	ipsilon
<i>E</i>	<i>ε, ε</i>	epsilon	<i>N</i>	<i>ν</i>	ni	<i>Φ</i>	<i>φ, ϕ</i>	fi
<i>Z</i>	<i>ζ</i>	dzeta	<i>Ξ</i>	<i>ξ</i>	ksi	<i>X</i>	<i>χ</i>	chi
<i>H</i>	<i>η</i>	eta	<i>O</i>	<i>ο</i>	omikron	<i>Ψ</i>	<i>ψ</i>	psi
<i>Θ</i>	<i>θ, ϑ</i>	theta	<i>Π</i>	<i>π, ϖ</i>	pi	<i>Ω</i>	<i>ω</i>	omega

Alfabet hebrajski

Z alfabetu hebrajskiego używamy pierwszej litery *א*, która nazywa się *alef*.

0

Zadania na dobry początek

Zadania z bieżącego rozdziału są rozwiązywane na pierwszych ćwiczeniach w semestrze. Zadań tych nie deklaruje się i nie są one punktowane.

Zadanie 1. Pan Hilary zgubił swoje okulary i w ich poszukiwaniu stwierdza następujące fakty:

- Jeśli czytałem gazetę w kuchni to okulary są na stole kuchennym.
- Jeśli okulary są na stole kuchennym, to widziałem je podczas śniadania.
- Nie widziałem okularów podczas śniadania.
- Czytałem gazetę w kuchni lub w sypialni.
- Jeśli czytałem gazetę w sypialni to okulary są na łóżku.

Czy z tych faktów można wywnioskować gdzie są okulary?

Zadanie 2. Oto fragment raportu policji sporządzony przez młodego aspiranta:

Świadek nie był zastraszony lub też, jeśli Henry popełnił samobójstwo, to testament odnaleziono. Jeśli świadek był zastraszony, to Henry nie popełnił samobójstwa. Jeśli testament odnaleziono, to Henry popełnił samobójstwo. Jeśli Henry nie popełnił samobójstwa, to testament odnaleziono.

Co komendant policji może wywnioskować z powyższego raportu (poza oczywistym faktem, że należy zwolnić aspiranta)? Odpowiedz na pytania: *Czy świadek był zastraszony? Czy Henry popełnił samobójstwo? Czy testament odnaleziono?*

Zadanie 3. Udowodnij, że istnieją takie liczby całkowite m i n , że $m > 1$, $n > 1$ oraz $\frac{1}{m} + \frac{1}{n}$ jest liczbą całkowitą.

Zadanie 4. Udowodnij, że stwierdzenie dla dowolnych nieujemnych liczb rzeczywistych a i b zachodzi równość $\sqrt{a} + \sqrt{b} = \sqrt{a+b}$ jest fałszywe.

Definicja 1. Mówimy, że liczba całkowita d jest *dzielnikiem* liczby całkowitej n jeśli istnieje taka liczba całkowita k , że $n = dk$. Mówimy, że liczba naturalna n jest *pierwsza* jeśli $n > 1$ oraz n nie ma innych niż 1 i n dzielników naturalnych; w przeciwnym przypadku, gdy n ma inne niż 1 i n dzielniki naturalne, mówimy że jest to liczba *złożona*.

Zadanie 5. Udowodnij, że dla wszystkich większych od 1 liczb całkowitych n liczba $n^2 + 2n$ jest złożona.

Zadanie 6. Udowodnij, że nie istnieje taka dodatnia liczba naturalna n , że $n^2 + 3n + 2$ jest liczbą pierwszą.

Zadanie 7. Udowodnij, że dla dowolnych liczb rzeczywistych a, b, c, d równość

$$(a + b)(c + d) = (a + c)(b + d)$$

zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy $a = d$ lub $b = c$.

Zadanie 8. Wskaż błąd w następujących „dowodach” twierdzenia, że dla wszystkich dodatnich liczb naturalnych k liczba $k^2 + 2k + 1$ jest złożona.

„Dowód” 1 Weźmy $k = 2$. Wtedy $k^2 + 2k + 1 = 2^2 + 2 \cdot 2 + 1 = 9$, ale liczba 9 dzieli się przez 3, więc 9 jest liczbą złożoną. Zatem twierdzenie jest prawdziwe.

„Dowód” 2 Weźmy dowolną dodatnią liczbę naturalną k . Jeśli $k^2 + 2k + 1$ jest liczbą złożoną to $k^2 + 2k + 1 = pq$ dla pewnych dodatnich liczb naturalnych p i q takich, że

$$1 < p < k^2 + 2k + 1$$

oraz

$$1 < q < k^2 + 2k + 1.$$

Skoro $k^2 + 2k + 1 = pq$ i obie liczby p i q są ściśle pomiędzy 1 i $k^2 + 2k + 1$, to znaczy że p i q są innymi niż 1 i $k^2 + 2k + 1$ dzielnikami liczby $k^2 + 2k + 1$, a zatem liczba $k^2 + 2k + 1$ jest złożona.

Definicja 2. Mówimy, że liczba całkowita n jest *parzysta* jeśli istnieje taka liczba całkowita k , że $n = 2k$. Mówimy, że n jest *nieparzysta* jeśli istnieje taka liczba całkowita k , że $n = 2k + 1$.

Zadanie 9. Wskaż błąd w następującym „dowodzie” twierdzenia, że różnica pomiędzy dowolną liczbą parzystą a dowolną nieparzystą jest nieparzysta.

„Dowód” Weźmy dowolną liczbę parzystą m i dowolną liczbę nieparzystą n . Z definicji parzystości wiemy, że $m = 2k$ dla pewnego k oraz $n = 2k + 1$ dla pewnego k . Wtedy $n - m = (2k + 1) - 2k = 1$. Skoro 1 jest liczbą nieparzystą, pokazaliśmy że różnica pomiędzy dowolną liczbą parzystą a dowolną nieparzystą jest nieparzysta.

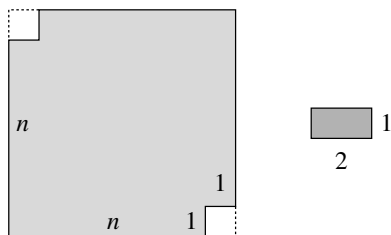
Zadanie 10. Wskaż błąd w następującym „dowodzie” twierdzenia, że iloczyn liczby parzystej przez nieparzystą jest parzysty.

„Dowód” Weźmy dowolną liczbę parzystą m i dowolną liczbę nieparzystą n . Jeśli mn jest parzysta, to z definicji parzystości istnieje taka liczba r , że $mn = 2r$. Z parzystości m wiemy, że istnieje taka liczba p , że $m = 2p$, a z nieparzystości n wiemy, że istnieje taka liczba q , że $n = 2q + 1$. Wtedy

$$mn = (2p)(2q + 1) = 2r.$$

Z definicji parzystości otrzymujemy, że mn jest parzysta, co kończy dowód.

Zadanie 11. Rozważmy kwadrat o boku n , gdzie $n \geq 3$, z którego usunięto dwa naprzeciwległe narożniki o wymiarach 1×1 , jak na poniższym rysunku:



Dla jakich n można tak otrzymaną figurę pokryć prostokątami o wymiarach 1×2 ? (Prostokąty można obracać.)

Indukcja matematyczna

Twierdzenie 3 (zasada indukcji). Niech X będzie takim podzbiorem zbioru liczb naturalnych \mathbb{N} , że

1. $0 \in X$, oraz
2. dla wszystkich liczb naturalnych n spełniona jest implikacja: jeśli $n \in X$ to $n + 1 \in X$.

Wtedy $X = \mathbb{N}$.

Dowolny zbiór spełniający warunki 1 i 2 powyższego twierdzenia nazywamy *induktywnym*. Innymi słowami, zbiór induktywny to zbiór zawierający 0 i zamknięty na dodawanie jedynki. Zasada indukcji w tej postaci mówi po prostu, że każdy zbiór induktywny zawiera zbiór liczb naturalnych. Zasada ta wynika wprost z definicji zbioru liczb naturalnych (formalnie jest to najmniejszy zbiór induktywny), ale głębsze rozważania na ten temat wybiegają poza ramy tego wykładu. Jeśli oprzemy się na wiedzy wyniesionej ze szkoły średniej, możemy do uzasadnienia zasady indukcji użyć zasady minimum mówiącej, że każdy niepusty podzbiór zbioru liczb naturalnych ma element najmniejszy.

Dowód (twierdzenia 3, oparty na zasadzie minimum). Przeprowadzimy dowód nie wprost. Gdyby $X \neq \mathbb{N}$ to zbiór $\mathbb{N} - X$ byłby niepusty, więc z zasady minimum miałby element najmniejszy. Niech k będzie najmniejszą liczbą naturalną w zbiorze $\mathbb{N} - X$. Oczywiście $k \neq 0$, bo $0 \in X$. Z faktu, że k jest najmniejszą liczbą naturalną nienależącą do X wnioskujemy, że $k - 1 \in X$. Wtedy z drugiego warunku otrzymujemy $k \in X$, co przeczy założeniu, że $k \notin X$. ■

Przykład 4. Rozważmy funkcję $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ zdefiniowaną rekurencyjnie wzorami $f(0) = 0$ oraz $f(n + 1) = f(n) + 2$. Pokażemy indukcyjnie, że $f(n) = 2n$ dla wszystkich $n \in \mathbb{N}$.

Niech $X = \{n \in \mathbb{N} \mid f(n) = 2n\}$. Z wzoru $f(0) = 0$ wynika, że $0 \in X$. Weźmy teraz dowolną liczbę naturalną n i założmy, że $n \in X$. Wtedy z tego założenia wynika, że $f(n) = 2n$ a z wzoru $f(n + 1) = f(n) + 2$ otrzymujemy $f(n + 1) = 2n + 2$,

czyli $f(n+1) = 2(n+1)$, a stąd $n+1 \in X$. Na mocy zasady indukcji otrzymujemy, że $X = \mathbb{N}$, czyli warunek $f(n) = 2n$ zachodzi dla wszystkich liczb naturalnych. ■

Typowy dowód indukcyjny składa się z dwóch części: dowodu, że $0 \in X$ (warunek ten oraz jego dowód są nazywane *podstawą indukcji*) oraz dowodu implikacji $n \in X \Rightarrow (n+1) \in X$ dla wszystkich liczb naturalnych n (zarówno ta implikacja jak i jej dowód są nazywane *krokiem indukcyjnym*). Warunek $n \in X$ w kroku indukcyjnym nazywamy *założeniem indukcyjnym* a warunek $(n+1) \in X$ *tezą indukcyjną*. Czasem tezę indukcyjną nazywa się także dowodzone twierdzenie, czyli warunek $\forall n \in \mathbb{N} \ n \in X$.

W literaturze spotyka się wiele różnych wersji zasady indukcji. Chyba najczęściej spotykaną jest wersja następująca.

Twierdzenie 5. Niech W będzie własnością liczb naturalnych spełniającą następujące dwa warunki.

- $W(0)$ jest prawdą, oraz
- dla wszystkich liczb naturalnych n , jeśli $W(n)$ jest prawdą to także $W(n+1)$ jest prawdą.

Wtedy wszystkie liczby naturalne mają własność W .

W tym miejscu należałoby się zastanowić, czym właściwie jest „własność”. Najwygodniej myśleć o niej jako o funkcji $W : \mathbb{N} \rightarrow \{\text{prawda}, \text{fałsz}\}$. Jeśli np. $W(n)$ zdefiniujemy jako „ $2^n \leq n!$ ”, to $W(4) = \text{prawda}$ (bo $2^4 = 16 \leq 24 = 4!$), natomiast $W(2) = \text{fałsz}$ (bo $2^2 = 4 \not\leq 2 = 2!$), czyli liczba 4 ma własność W a liczba 2 jej nie ma.

Twierdzenia 3 i 5 są w istocie rzeczy tym samym twierdzeniem (zasadą indukcji), różnią się tylko sformułowaniem. Formalnie oba twierdzenia wynikają z siebie nawzajem. Żeby uzasadnić, że twierdzenie 5 wynika z twierdzenia 3 wystarczy użyć zbioru $\{n \in \mathbb{N} \mid W(n)\}$ i zauważyć jego induktywność. Żeby zobaczyć, że twierdzenie 3 wynika z twierdzenia 5 wystarczy zdefiniować własność $W(n)$ jako „ $n \in X$ ”.

Czasem chcemy wykazać prawdziwość pewnej własności dla wszystkich liczb naturalnych większych od zadanej liczby początkowej. Można w tym celu skorzystać z następującej wersji zasady indukcji.

Twierdzenie 6 (zasada indukcji, wersja 3). Niech $a \in \mathbb{N}$ i niech W będzie własnością liczb naturalnych spełniającą następujące dwa warunki.

- $W(a)$ jest prawdą, oraz
- dla wszystkich liczb naturalnych $n \geq a$, jeśli $W(n)$ jest prawdą to $W(n+1)$ też jest prawdą.

Wtedy dla wszystkich liczb naturalnych $n \geq a$ zachodzi $W(n)$.

Prawdziwość tej wersji zasady indukcji można uzasadnić korzystając z twierdzenia 3 i zauważając, że zbiór

$$\{n \in \mathbb{N} \mid \text{jeśli } n \geq a \text{ to } W(n)\}$$

jest induktywny.

Przykład 7. Pokażemy indukcyjnie, że $2^n \leq n!$ dla każdego $n \geq 4$. Skorzystamy z twierdzenia 6 dla własności $W(n)$ zdefiniowanej jako $2^n \leq n!$ oraz dla $a = 4$.

W tym przypadku podstawa indukcji to warunek $W(4)$. Warunek ten jest prawdziwy, bo $2^4 = 16$, $4! = 24$ oraz $16 < 24$.

Dla uzasadnienia kroku indukcyjnego weźmy dowolne $n \geq 4$ i założmy, że $2^n < n!$. Pokażemy, że $2^{n+1} < (n+1)!$. Wiemy, że $2^{n+1} = 2 \cdot 2^n$, zatem z założenia indukcyjnego wynika, że $2^{n+1} < 2 \cdot n!$. Ponieważ $n \geq 4$, więc $2 < (n+1)$ a zatem $2^{n+1} < (n+1) \cdot n!$. Czyli $2^{n+1} < (n+1)!$, co należało pokazać.

Z zasady indukcji wnioskujemy, że $2^n \leq n!$ dla wszystkich liczb naturalnych $n \geq 4$. ■

Często w dowodach indukcyjnych zamiast założenia indukcyjnego, że liczba n ma własność W potrzebujemy silniejszego założenia, że wszystkie liczby naturalne od a do n mają własność W . Używając bardziej zwięzłej notacji matematycznej, odpowiednią zasadę indukcji możemy zapisać następująco.

Twierdzenie 8 (zasada indukcji, wersja 4). Niech $a \in \mathbb{N}$ i niech X będzie takim podzbiorem zbioru liczb naturalnych \mathbb{N} , że

- $a \in X$,
- dla wszystkich liczb naturalnych $n \geq a$ spełniona jest implikacja

$$(\forall a \leq i \leq n \ i \in X) \Rightarrow (n+1) \in X.$$

Wtedy dla wszystkich $n \geq a$ zachodzi $n \in X$.

Prawdziwość takiej zasady indukcji dowodzi się wykazując że zbiór

$$\{n \in \mathbb{N} \mid \text{jeśli } n \geq a \text{ to } \forall a \leq i \leq n \ i \in X\}$$

jest induktywny.

W szczególnym przypadku, gdy $a = 0$, powyższe warunki się upraszczają i całe twierdzenie można zapisać w następującej postaci. Zakładamy tutaj, że zmienne i, n przebiegają zbiór liczb naturalnych (w szczególności nie mogą być ujemne).

Twierdzenie 9 (zasada indukcji, wersja 5). Jeśli $X \subseteq \mathbb{N}$ spełnia warunek

$$\forall n ((\forall i < n \ i \in X) \Rightarrow n \in X)$$

to $X = \mathbb{N}$.

W tej wersji podstawa indukcji jest szczególnym przypadkiem kroku indukcyjnego: dla $n = 0$ wszystkie liczby mniejsze od n (a jest tych liczb dokładnie zero) są już w zbiorze X , więc warunek z treści twierdzenia wymusza $0 \in X$.

Przykład 10. Rozważmy układankę puzzle złożoną z n kawałków obrazka. Ułożenie obrazka zaczyna się od połączenia ze sobą dwóch pasujących do siebie kawałków, a w kolejnych ruchach łączy się ze sobą dwa pasujące do siebie fragmenty obrazka (złożone z jednego lub więcej kawałków). Pokażemy indukcyjnie, że dla każdego obrazka złożonego z n kawałków każde jego ułożenie wymaga wykonania dokładnie $n - 1$ ruchów. Skorzystamy w tym celu z twierdzenia 8 dla $a = 1$.

Niech X będzie zbiorem takich liczb naturalnych $n \geq 1$, że dla każdego obrazka złożonego z n kawałków każde jego ułożenie wymaga wykonania dokładnie $n - 1$ ruchów.

Podstawa indukcji: Oczywiście liczba 1 należy do zbioru X , bo ułożenie dowolnego obrazka złożonego z 1 kawałka wymaga dokładnie 0 ruchów.

Krok indukcyjny: Weźmy teraz dowolną liczbę naturalną $n \geq 1$ i załóżmy, że dla wszystkich takich liczb naturalnych i , że $i \geq 1$ i $i \leq n$ zachodzi $i \in X$. Pokażemy, że $n + 1 \in X$. W tym celu weźmy dowolny obrazek złożony z $n + 1$ kawałków i rozważmy dowolny sposób jego ułożenia, nazwijmy ten sposób s . W ostatnim ruchu ułożenia s połączono ze sobą dwa fragmenty obrazka. Niech i będzie liczbą kawałków pierwszego fragmentu. Wtedy drugi fragment składa się z $(n + 1) - i$ kawałków. Obie liczby i oraz $(n + 1) - i$ są nie mniejsze niż 1 i nie większe niż n , zatem z założenia indukcyjnego obie należą do zbioru X . Oba fragmenty naszego obrazka są obrazkami złożonymi odpowiednio z i oraz $(n + 1) - i$ kawałków, zatem każde ich ułożenie wymagało odpowiednio dokładnie $i - 1$ oraz $(n + 1) - i - 1$ ruchów. Ułożenie s składało się zatem z $(i - 1) + (n + 1) - i - 1 + 1 = n$ ruchów: ułożenia pierwszego i drugiego fragmentu oraz połączenia tych fragmentów. Z dowolności wyboru obrazka i sposobu jego ułożenia wnioskujemy, że ułożenie dowolnego obrazka złożonego z $n + 1$ kawałków wymaga dokładnie n ruchów. Zatem $n + 1 \in X$.

Na mocy zasady indukcji wnioskujemy, że dla każdej liczby naturalnej $n \geq 1$ ułożenie dowolnego obrazka puzzle złożonego z n kawałków wymaga wykonania dokładnie $n - 1$ ruchów. ■

Zadanie 12. Udowodnij, że dla wszystkich liczb naturalnych $n \geq 1$ liczba 6^n w zapisie dziesiętnym kończy się cyfrą 6.

Zadanie 13. Udowodnij indukcyjnie, że suma pierwszych n liczb nieparzystych wynosi n^2 .

Zadanie 14. Firma cateringowa pakuje kanapki wyłącznie w pudełka po 3 lub 5 sztuk. Udowodnij indukcyjnie, że każdą liczącą co najmniej 8 sztuk liczbę kanapek da się zapakować w takie pudełka tak, aby wszystkie pudełka były pełne.

Definicja 11. Liczby Fibonacciego F_0, F_1, F_2, \dots definiuje się równaniami

- $F_0 = 0, F_1 = 1,$
- $F_n = F_{n-2} + F_{n-1}$ dla $n \geq 2$.

Zadanie 15. Udowodnij indukcyjnie, że dla każdego $n \in \mathbb{N}$ zachodzi $F_n \leq F_{n+1}$,

Zadanie 16. Udowodnij, że jeśli $n > 3$, to $F_{n+1} < 2F_n$.

Zadanie 17. Udowodnij, że dla wszystkich $n \geq 1, n \in \mathbb{N}$ zachodzi równość

$$F_{n+1} = 1 + \sum_{i=0}^{n-1} F_i.$$

Zadanie 18. Udowodnij, że dla wszystkich $n \geq 1, n \in \mathbb{N}$ zachodzi równość

$$F_n^2 = (-1)^{n+1} + F_{n-1}F_{n+1}.$$

Zadanie 19. Udowodnij, że dla wszystkich $n \in \mathbb{N}$ zachodzi równość

$$F_{2n+1} = F_n^2 + F_{n+1}^2.$$

Zadanie 20. Udowodnij, że dla wszystkich $n \geq 3, n \in \mathbb{N}$ liczby F_n i F_{n+1} są względnie pierwsze (tzn. nie mają wspólnych dzielników pierwszych).

Zadanie 21. Oto przykłady trzech wnioskowań przez indukcję:

1. Pokażę, że wszystkie liczby naturalne są parzyste. Oczywiście 0 jest liczbą parzystą. Niech n będzie dowolną liczbą naturalną i założmy, że dla wszystkich $k < n$, k jest parzyste. Niech n_1 i n_2 będzie dowolnym rozbiem liczby n na sumę liczb mniejszych (tzn. $n = n_1 + n_2$). Ponieważ n_1 oraz n_2 są mniejsze od n , n_1 i n_2 są parzyste, a więc n jest parzyste jako suma dwóch liczb parzystych.

2. Pokażę, że wszystkie dodatnie liczby naturalne są nieparzyste. Oczywiście 1 jest liczbą nieparzystą. Niech n będzie dowolną liczbą naturalną większą od 1 i założmy, że dla wszystkich $k < n$, k jest nieparzyste. Niech 1, n_1 i n_2 będzie dowolnym rozbiem liczby n na sumę trzech liczb mniejszych (tzn. $n = n_1 + n_2 + 1$). Ponieważ n_1 oraz n_2 są mniejsze od n , n_1 i n_2 są nieparzyste, a więc n jest nieparzyste jako suma dwóch liczb nieparzystych i liczby 1.

3. Pokaż, że wszystkie proste na płaszczyźnie są równoległe. Rozważmy jednoelementowy zbiór prostych na płaszczyźnie. Oczywiście wszystkie proste należące do tego zbioru są do siebie równoległe. Załóżmy, że w każdym n -elementowym zbiorze prostych wszystkie proste są do siebie równoległe. Rozważmy teraz $n + 1$ -elementowy zbiór prostych. Ustalmy w nim jedną prostą p . Na mocy założenia indukcyjnego wszystkie pozostałe n prostych jest do siebie równoległe. Ustalmy teraz inną prostą q . Na mocy założenia indukcyjnego wszystkie pozostałe n prostych jest również do siebie równoległe. Ponieważ relacja równoległości prostych jest przechodnia, wszystkie $n + 1$ prostych jest równoległe. Na mocy zasady indukcji matematycznej każdy zbiór prostych na płaszczyźnie zawiera wyłącznie proste równoległe. W szczególności dotyczy to zbioru wszystkich prostych na płaszczyźnie.

Które z tych rozumowań jest poprawne? Wskaż błędy popełnione w błędnych rozumowaniach.

Zadanie 22. W klasie jest $2n$ dzieci i n dwuosobowych ławek. Wykaż przez indukcję, że dzieci można podzielić w pary na $\frac{(2n)!}{2^n n!}$ sposobów i rozsadzić w ławkach na $\frac{(2n)!}{2^n}$ sposobów.

Zadanie 23. Udowodnij, że jeśli wyrazy ciągu spełniają warunki $a_0 = 2$, $a_1 = 3$ i $a_{n+1} = 3a_n - 2a_{n-1}$ dla $n \geq 1$, to $a_n = 2^n + 1$.

Zadanie 24. Znajdź błąd w następującym rozumowaniu. Pokaż, że dla wszystkich liczb rzeczywistych r i wszystkich liczb naturalnych n zachodzi równość $r^n = 1$. Oczywiście dla $n = 0$ mamy $r^n = 1$. Niech n będzie dowolną liczbą naturalną i założmy, że dla wszystkich $k \leq n$ zachodzi równość $r^k = 1$. Wtedy $r^{n+1} = r^{n+n-(n-1)} = \frac{r^n \cdot r^n}{r^{n-1}}$. Ponieważ liczby n oraz $n - 1$ są nie większe niż n , więc z założenia indukcyjnego mamy $r^n = r^{n-1} = 1$. Zatem $r^{n+1} = \frac{1 \cdot 1}{1} = 1$, co kończy dowód.

Zadanie 25. Udowodnij, że obszary wyznaczone przez dowolną skończoną liczbę prostych na płaszczyźnie można pokolorować dwoma kolorami tak, by żadne dwa obszary o tym samym kolorze nie miały wspólnego boku.

Zadanie 26. Niech $X \subseteq \mathbb{N}$ będzie takim zbiorem, że spełniona jest koniunkcja warunków

1. $0, 1 \in X$
2. $\forall n (n \in X \Rightarrow 2n \in X)$
3. $\forall n (n + 1 \in X \Rightarrow n \in X)$

Udowodnij, że $X = \mathbb{N}$.

Zadanie 27. Wykaż indukcyjnie, że $2^n \geq n^2$ dla każdego $n \geq 5$.

Zadanie 28. Dany jest zbiór $X \subseteq \mathbb{N}$ spełniający warunki:

1. $0, 1 \in X$,
2. jeśli $x \in X$ oraz $x + 1 \in X$ to $x + 2 \in X$, dla każdej liczby naturalnej x .

Wykaż, że $X = \mathbb{N}$. Czy to twierdzenie pozostanie słuszne, jeśli warunek 1. zastąpimy przez słabszy warunek $0 \in X$?

Zadanie 29. Rozważmy grę, w której ruchy wykonują na zmianę gracze A i B . Gracz A dostaje n cukierków i rozpoczyna grę. W każdym kroku gracz, który ma cukierki, zjada jeden lub dwa cukierki i przekazuje resztę cukierków przeciwnikowi. Wygrywa ten gracz, który zje ostatniego cukierka. Wykaż, że jeśli n dzieli się przez 3, to gracz B potrafi wygrać niezależnie od ruchów gracza A , natomiast jeśli n nie dzieli się przez 3, to gracz A potrafi wygrać niezależnie od ruchów gracza B .

Zadanie 30. Wykaż, że n prostych przecina się na płaszczyźnie w co najwyżej $\frac{n(n-1)}{2}$ punktach.

Zadanie 31. Wykaż indukcyjnie, że dla wszystkich liczb rzeczywistych $x > -1$ oraz wszystkich liczb naturalnych n zachodzi nierówność $(1+x)^n \geq 1+nx$.


Zadanie 32. Na stole znajdują się trzy szklanki, każda wypełniona dokładnie w połowie. W pierwszej z nich znajduje się martini, w dwóch pozostałych woda sodowa. Nie mamy żadnej miarki do odmierzania płynów; jedyną operacją, jaką możemy wykonać, jest przelanie zawartości z jednej szklanki do drugiej aż do wypełnienia tej drugiej (lub opróżnienia pierwszej) szklanki. Zakładamy przy tym, że podczas przelewania nic się nie rozlewa oraz że po przelaniu płyn zostaje dokładnie wymieszany. Czy można w skończonej liczbie kroków dokładnie wymieszać martini z wodą sodową tak, aby otrzymać roztwór, którego $1/3$ objętości stanowi martini?

Zadanie 33. Iloczyn liczb x_1, x_2 i x_3 można obliczyć mnożąc najpierw x_1 przez x_2 a potem mnożąc wynik przez x_3 , ale można też najpierw wymnożyć x_1 przez x_3 i potem wynik wymnożyć przez x_2 . Udowodnij, że dla każdej liczby naturalnej $n \geq 1$ obliczenie iloczynu n liczb wymaga zawsze, bez względu na kolejność tych liczb i rozstawienie nawiasów, wykonania $n-1$ mnożeń.

Zadanie 34. Wiadomo, że Chiny powstały około roku 1700 p.n.e. Przyjmijmy dla uproszczenia, że w roku 1700 p.n.e. o każdym żyjącym wtedy człowieku na ziemi można było jednoznacznie powiedzieć, czy jest Chińczykiem. Osoby, które były wtedy Chińczykami nazwiemy 1-Chińczykami, wszystkie pozostałe żyjące wtedy osoby nazwiemy 0-Chińczykami. Osobę, której ojciec jest c_1 -Chińczykiem a matka

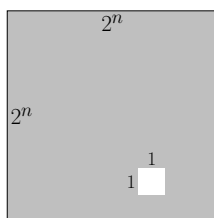
c_2 -Chińczykiem, nazwiemy $\frac{c_1+c_2}{2}$ -Chińczykiem. Udowodnij, że nikt z żyjących obecnie na świecie ludzi nie jest $\frac{1}{3}$ -Chińczykiem.

Wskazówka: udowodnij indukcyjnie, że każda żyjąca po roku 1700 p.n.e. osoba jest $\frac{k}{2^l}$ -Chińczykiem dla pewnych liczb naturalnych k i l .

W kolejnych zadaniach *triomino* () to kwadrat o boku 2, z którego usunięto jeden narożnik o wymiarach 1×1 .

Zadanie 35. Udowodnij, że dla wszystkich liczb naturalnych $n \geq 1$ prostokąt o wymiarach $2 \times 3n$ można pokryć triominami.

Zadanie 36. Rozważmy kwadrat o boku 2^n , gdzie $n \geq 1$, z usuniętym dowolnym kwadratem o boku 1, tak jak na rysunku:



Udowodnij, że każdy taki kwadrat można pokryć triominami.

2

Rachunek zdań

2.1. Składnia rachunku zdań

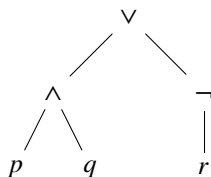
Definicja 12. *Formuły rachunku zdań* nad zbiorem zmiennych zdaniowych V budujemy ze *zmiennych zdaniowych* z V i *spójników logicznych*: fałszu \perp , prawdy \top , negacji \neg , koniunkcji \wedge , alternatywy \vee , implikacji \Rightarrow i równoważności \Leftrightarrow w następujący sposób:

1. Symbole \perp i \top są formułami rachunku zdań.
2. Każda zmienna zdaniowa ze zbioru V jest formułą rachunku zdań.
3. Jeżeli ϕ i ψ są formułami rachunku zdań, to są nimi także: $\neg\phi$, $\phi \wedge \psi$, $\phi \vee \psi$, $\phi \Rightarrow \psi$ i $\phi \Leftrightarrow \psi$.
4. Wszystkie formuły rachunku zdań można zbudować przy pomocy reguł opisanych w punktach 1–3.

Innymi słowy, zbiór formuł rachunku zdań jest to najmniejszy zbiór zawierający stałe \perp i \top , zmienne zdaniowe, i zamknięty na spójniki \neg , \wedge , \vee , \Rightarrow i \Leftrightarrow . Zbiór wszystkich formuł nad zbiorem zmiennych zdaniowych V będziemy oznaczać przez $\mathcal{F}(V)$. Zmienne zdaniowe będziemy oznaczać literami: p , q , r , s itd., często z indeksami: p_1 , p_2 itd. Formuły zdaniowe będziemy oznaczać literami: ϕ , ψ , ρ itd., często również z indeksami: ϕ_1 , ϕ_2 itd.

Będziemy używać składni w dwóch wersjach: *konkretnej* i *abstrakcyjnej*. W składni konkretnej formuła jest ciągiem znaków (napisem), natomiast w składni abstrakcyjnej drzewem (algebraicznym typem danych) ze spójnikami logicznymi w węzłach wewnętrznych oraz stałymi i zmiennymi w liściach (por. rysunek 1). Proces tłumaczenia składni konkretnej na abstrakcyjną nazywa się *parsowaniem*; odwrotny proces tłumaczenia składni abstrakcyjnej na konkretną to *wypisywanie* formuły (ang. *pretty printing*). Mówiąc „formuła” zwykle mamy na myśli składnię abstrakcyjną, dlatego np. przyjmujemy, że w formułach nie występują nawiasy.

Składnia abstrakcyjna w jednoznaczny sposób podaje kolejność użytych spójników logicznych, jednak niewygodnie się jej używa do zapisywania formuł na tablicy



Rysunek 1. Formuła $p \wedge q \vee \neg r$ w składni abstrakcyjnej

\perp	\top	ϕ	$\neg\phi$	ϕ	ψ	$\phi \wedge \psi$
F	T	F	T	F	F	F
		F	T	F	T	F
		T	F	T	F	F
				T	T	T

ϕ	ψ	$\phi \vee \psi$	ϕ	ψ	$\phi \Rightarrow \psi$	ϕ	ψ	$\phi \Leftrightarrow \psi$
F	F	F	F	F	T	F	F	T
F	T	T	F	T	T	F	T	F
T	F	T	T	F	F	T	F	F
T	T	T	T	T	T	T	T	T

Rysunek 2. Znaczenie spójników logicznych

czy papierze. Zapisując formuły w składni konkretnej spłaszczamy ich drzewiastą strukturę, i żeby tej struktury całkowicie nie stracić, używamy nawiasów. Dla większej czytelności będziemy niektóre nawiasy opuszczać, zakładając następującą kolejność wiązania (od najsilniejszego do najsłabszego): \neg , \wedge , \vee , \Rightarrow , \Leftrightarrow i przyjmując, że \wedge , \vee i \Leftrightarrow łączą w lewo, tj. np. $p \vee r \vee s$ znaczy $(p \vee r) \vee s$, zaś \Rightarrow — w prawo, tj. np. $p \Rightarrow r \Rightarrow s$ znaczy $p \Rightarrow (r \Rightarrow s)$. Zatem np. $p \vee q \vee r \wedge s$ oznacza $(p \vee q) \vee (r \wedge s)$.

2.2. Wartości logiczne i znaczenie formuł zdaniowych

Definicja 13. Zbiór wartości logicznych $\mathcal{B} = \{T, F\}$ zawiera dwa elementy: T (prawda) i F (fałsz).¹ Niech V oznacza zbiór zmiennych zdaniowych. Wartościowanie zmiennych, to odwzorowanie $\sigma : V \rightarrow \mathcal{B}$. Nadaje ono wartości logiczne zmiennym zdaniowym.

¹Oznaczenia pochodzą od angielskich słów *true* i *false*.

Wartość logiczna dowolnej formuły zdaniowej zależy jedynie od wartościowania występujących w niej zmiennych i można ją wyznaczyć korzystając z tabel z rysunku 2. Dlatego mówimy, że wartościowanie zmiennych nadaje wartość logiczną formułom. Formalnie, wartościowanie zmiennych σ wyznacza *wartościowanie formuły* $\hat{\sigma}$, które przypisuje wartości logiczne dowolnym formułom w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
 \hat{\sigma}(\perp) &= F \\
 \hat{\sigma}(\top) &= T \\
 \hat{\sigma}(p) &= \sigma(p) \\
 \hat{\sigma}(\neg\phi) &= \begin{cases} T, & \text{gdy } \hat{\sigma}(\phi) = F \\ F, & \text{gdy } \hat{\sigma}(\phi) = T \end{cases} \\
 \hat{\sigma}(\phi_1 \wedge \phi_2) &= \begin{cases} T, & \text{gdy } \hat{\sigma}(\phi_1) = T \text{ i } \hat{\sigma}(\phi_2) = T \\ F, & \text{w p.p.} \end{cases} \\
 \hat{\sigma}(\phi_1 \vee \phi_2) &= \begin{cases} T, & \text{gdy } \hat{\sigma}(\phi_1) = T \text{ lub } \hat{\sigma}(\phi_2) = T \\ F, & \text{w p.p.} \end{cases} \\
 \hat{\sigma}(\phi_1 \Rightarrow \phi_2) &= \begin{cases} F, & \text{gdy } \hat{\sigma}(\phi_1) = T \text{ i } \hat{\sigma}(\phi_2) = F \\ T, & \text{w p.p.} \end{cases} \\
 \hat{\sigma}(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2) &= \begin{cases} T, & \text{gdy } \hat{\sigma}(\phi_1) = \hat{\sigma}(\phi_2) \\ F, & \text{w p.p.} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Wartość logiczną $\hat{\sigma}(\phi) \in \mathcal{B}$ nazywamy *wartością logiczną formuły ϕ przy wartościowaniu σ* . Ponieważ dla danego wartościowania zmiennych wartościowanie formuły jest określone jednoznacznie, znak $\hat{\sigma}$ możemy opuszczać i zarówno wartościowanie zmiennych, jak i wartościowanie formuły oznaczać tym samym symbolem i nazywać po prostu *wartościowaniem*.

Definicja 14. Mówimy, że formuła ϕ jest *spełniona* przy wartościowaniu zmiennych σ (lub, że wartościowanie σ *spełnia* formułę ϕ), jeżeli $\hat{\sigma}(\phi) = T$. Piszemy wtedy $\sigma \models \phi$; jeśli natomiast $\hat{\sigma}(\phi) = F$, to piszemy $\sigma \not\models \phi$.

Definicja 15. Formuła jest:

- *spełnialna*, jeżeli istnieje wartościowanie zmiennych, dla którego ta formuła jest spełniona;
- *prawdziwa* (jest *tautologią*), jeśli jest spełniona dla każdego wartościowania zmiennych;
- *sprzeczna*, jeśli nie jest spełniona (ma wartość F) dla żadnego wartościowania zmiennych.

$$\phi = \neg(p \vee q) \Leftrightarrow \neg p \wedge \neg q$$

1	2	3	4	5	6	7	8
p	q	$p \vee q$	$\neg(p \vee q)$	$\neg p$	$\neg q$	$\neg p \wedge \neg q$	ϕ
F	F	F	T	T	T	T	T
F	T	T	F	T	F	F	T
T	F	T	F	F	T	F	T
T	T	T	F	F	F	F	T

Rysunek 3. Tabelkowa metoda sprawdzenia, że formuła ϕ jest tautologią

O formule spełnionej przy danym wartościowaniu zmiennych będziemy niekiedy mówić, że jest *prawdziwa* przy tym wartościowaniu. W analogicznej sytuacji, gdy formuła nie jest spełniona, będziemy ją nazywać *fałszywą* przy tym wartościowaniu.

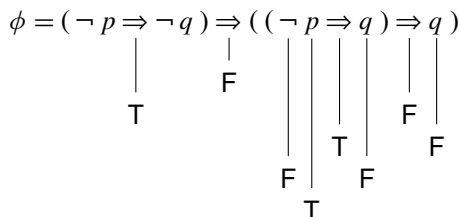
Obecnie zajmiemy się sposobami sprawdzania, czy dana formuła jest tautologią.

2.2.1. Metoda zero-jedynkowa

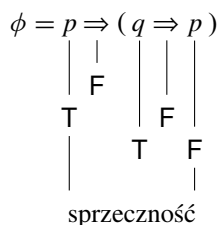
Przykładami tautologii są formuły $\neg(p \vee q) \Leftrightarrow \neg p \wedge \neg q$ oraz $\neg(p \wedge q) \Leftrightarrow \neg p \vee \neg q$ zwane *prawami De Morgana*. Aby się o tym przekonać rysujemy tabelkę (rysunek 3) umieszczając w kolumnach 1 i 2 wartości zmiennych zdaniowych p i q . W kolumnie 3 umieszczamy wartości formuły $p \vee q$ wyliczone z użyciem tabelki dla alternatywy. W kolumnie 4 obliczamy, w oparciu o tabelkę negacji, wartości formuły $\neg(p \vee q)$. Kolumny 5 i 6 wyznaczamy również w oparciu o tabelkę negacji. Aby wyznaczyć wartości formuły $(\neg p) \wedge (\neg q)$ korzystamy z wartości zapisanych w kolumnach 5 i 6 i z tabelki koniunkcji. Ostatnią, ósmą kolumnę wyznaczamy przy użyciu tabelki dla równoważności z wartości logicznych zapisanych w kolumnach 4 i 7. Po skonstruowaniu tabelki zauważamy, że dla każdego z czterech możliwych wartościowań zmiennych p i q formuła $\neg(p \vee q) \Leftrightarrow (\neg p) \wedge (\neg q)$ ma wartość logiczną T, jest więc tautologią.

2.2.2. Skrócona metoda zero-jedynkowa

Sprawdzenie czy formuła jest tautologią można znacznie przyspieszyć, jeśli zamiast bezmyślnie sprawdzać wartość formuły dla wszystkich możliwych wartościowań zmiennych, będziemy świadomie poszukiwać wartościowania, dla którego formuła nie jest spełniona. Ustalenie takiego wartościowania przekona nas, że formuła nie jest tautologią, dojście do sprzeczności zaś — że nią jest. Rozważmy dla ustalenia uwagi formułę $(\neg p \Rightarrow \neg q) \Rightarrow ((\neg p \Rightarrow q) \Rightarrow q)$. Formuła ta nie jest spełniona, jeśli poprzednik implikacji $\neg p \Rightarrow \neg q$ jest prawdziwy przy pewnym wartościowaniu σ , jej następnik $(\neg p \Rightarrow q) \Rightarrow q$ zaś fałszywy przy tym wartościowaniu. For-



Rysunek 4. Wartościowanie, dla którego formuła ϕ nie jest spełniona



Rysunek 5. Ilustracja dowodu nie wprost, iż formuła ϕ jest tautologią

muła $(\neg p \Rightarrow q) \Rightarrow q$ jest fałszywa tylko wówczas, gdy $\neg p \Rightarrow q$ jest spełniona oraz $\sigma(q) = F$. Ale $\neg p \Rightarrow q$ jest spełniona dla $\sigma(q) = F$ tylko wówczas, gdy $\neg p$ nie jest spełniona, tj. gdy $\sigma(p) = T$. Zauważamy na koniec, że przy wartościowaniu $\sigma(p) = T$ i $\sigma(q) = F$ nasza wyjściowa formuła istotnie nie jest spełniona, nie jest więc tautologią (rysunek 4).

Rozważmy teraz formułę $\phi = p \Rightarrow (q \Rightarrow p)$. Aby ϕ nie była spełniona przy wartościowaniu σ , musi być $\sigma(p) = T$ oraz powinna nie być spełniona formuła $q \Rightarrow p$. Ostatnia formuła nie jest spełniona tylko wówczas, gdy $\sigma(q) = T$ oraz $\sigma(p) = F$. Zatem aby ϕ nie była spełniona, musiałyby być jednocześnie $\sigma(p) = T$ i $\sigma(p) = F$, co jest niemożliwe. Formuła ϕ jest zatem tautologią (rysunek 5).

Zadanie 37. Udowodnij, że podane formuły są tautologiami.

1. (modus ponens) $(p \Rightarrow q) \wedge p \Rightarrow q$
2. (modus tollens) $(p \Rightarrow q) \wedge \neg q \Rightarrow \neg p$
3. (prawo kompozycji) $(p \vee q \Rightarrow r) \Rightarrow p \Rightarrow r$
4. (prawo kompozycji) $(p \vee q \Rightarrow r) \Rightarrow q \Rightarrow r$
5. (prawo symplifikacji) $p \wedge q \Rightarrow p$
6. (prawo symplifikacji) $q \Rightarrow p \vee q$
7. (prawo symplifikacji) $p \Rightarrow q \Rightarrow p$

8. (prawo Dunsza Szkota) $\neg p \Rightarrow p \Rightarrow q$
9. (prawo dylematu konstrukcyjnego) $(p \Rightarrow r) \wedge (q \Rightarrow r) \wedge (p \vee q) \Rightarrow r$
10. (prawo eksportacji) $(p \wedge q \Rightarrow r) \Rightarrow p \Rightarrow q \Rightarrow r$
11. (prawo importacji) $(p \Rightarrow q \Rightarrow r) \Rightarrow p \wedge q \Rightarrow r$
12. (prawo redukcji do absurdu) $(p \Rightarrow \neg p) \Rightarrow \neg p$
13. (prawo sprzeczności) $\neg(p \wedge \neg p)$
14. (prawo wyłączonego środka) $p \vee \neg p$
15. (prawo sylogizmu hipotetycznego) $(p \Rightarrow q) \Rightarrow (q \Rightarrow r) \Rightarrow p \Rightarrow r$
16. (prawo Peirce'a) $((p \Rightarrow q) \Rightarrow p) \Rightarrow p$
17. (Prawo Claviusa) $(\neg p \Rightarrow p) \Rightarrow p$
18. (prawo tożsamości) $p \Leftrightarrow p$

Powyższe tautologie były od dawna badane przez logików, gdyż opisują typowe schematy przeprowadzania rozumowań. Ich zwyczajowe nazwy podano w nawiasach.

Zadanie 38. Sprawdź, które z podanych formuł są (a) tautologiami, (b) formułami spełnialnymi, (c) formułami sprzecznymi.

1. $p \vee q \vee r \Rightarrow \neg p \Rightarrow (q \vee r) \wedge \neg p$
2. $(p \Rightarrow q) \Leftrightarrow (p \wedge q \Leftrightarrow p)$
3. $(p \vee q \Rightarrow r) \Rightarrow (p \Rightarrow r) \vee (q \Rightarrow r)$
4. $(p \Rightarrow q) \wedge (r \Rightarrow s) \Rightarrow p \wedge s \Rightarrow q \vee r$
5. $p \vee q \vee r \Rightarrow ((p \vee q) \wedge \neg r) \vee (r \wedge p \wedge q)$
6. $((p \vee q) \wedge \neg r) \vee (r \wedge p \wedge q) \Rightarrow p \vee q \vee r$
7. $(p \vee q \Leftrightarrow r \vee s) \Rightarrow ((p \Leftrightarrow r) \vee (q \Leftrightarrow s))$
8. $(p \Leftrightarrow r) \vee (q \Leftrightarrow s) \Rightarrow (p \vee q \Leftrightarrow r \vee s)$
9. $(p \wedge q \Leftrightarrow r \wedge s) \Rightarrow ((p \Leftrightarrow r) \wedge (q \Leftrightarrow s))$
10. $(p \Rightarrow q \Rightarrow r) \Rightarrow ((p \Rightarrow q) \Rightarrow (p \Rightarrow r))$
11. $(p \vee q) \wedge \neg p \Rightarrow q$
12. $(p \Rightarrow q) \Rightarrow p \wedge r \Rightarrow q$
13. $(p \Rightarrow q) \Rightarrow p \Rightarrow q \vee r$
14. $p \Rightarrow \neg p \vee q$
15. $(p \vee q) \wedge (p \Rightarrow q) \Rightarrow q \Rightarrow p$

16. $\neg(p \wedge (\neg p \wedge q))$
17. $p \Rightarrow \neg q \wedge q \Rightarrow r$
18. $(p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow p) \Rightarrow p \vee q$
19. $(p \vee q \Rightarrow p \vee \neg q) \Rightarrow \neg p \vee q$
20. $(p \wedge q) \vee (p \Rightarrow q) \Rightarrow p \Rightarrow q$
21. $(p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow r) \Rightarrow (p \Rightarrow r)$
22. $(p \Rightarrow q) \wedge (r \Rightarrow s) \Rightarrow p \vee r \Rightarrow q \vee s$
23. $(p \wedge q \Rightarrow r) \Rightarrow (p \Rightarrow r) \wedge (q \Rightarrow r)$
24. $(p \Rightarrow q) \wedge (r \Rightarrow s) \Rightarrow p \wedge r \Rightarrow q \wedge s$
25. $(p \wedge q \Rightarrow r) \wedge (p \vee q \Rightarrow \neg r) \Rightarrow p \wedge q \wedge r$
26. $\neg(p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow p) \Rightarrow p \wedge \neg q$
27. $((p \Rightarrow q) \Rightarrow q \Rightarrow r) \Rightarrow (r \Rightarrow p) \Rightarrow q \Rightarrow p$
28. $(p \Rightarrow q) \vee (p \Rightarrow r) \vee (p \Rightarrow s) \Rightarrow p \Rightarrow q \vee r \vee s$
29. $(p \Rightarrow q) \wedge (r \Rightarrow q) \wedge (s \Rightarrow q) \Rightarrow p \wedge r \wedge s \Rightarrow q$
30. $(p \Rightarrow q) \wedge (r \Rightarrow q) \wedge (s \Rightarrow q) \Rightarrow p \wedge r \wedge \neg s \Rightarrow q$
31. $(p \wedge q \Rightarrow r) \wedge (p \wedge q \Rightarrow \neg r) \Rightarrow \neg p \wedge \neg q \wedge \neg r$
32. $(\neg p \wedge q) \vee (p \vee \neg q) \Rightarrow (p \Rightarrow q \vee r) \Rightarrow p \Rightarrow r$
33. $(p \vee q) \wedge (r \vee s) \Rightarrow ((p \Rightarrow q) \vee (p \Rightarrow r)) \wedge ((q \Rightarrow s) \vee (q \Rightarrow p))$
34. $(p \Rightarrow q) \wedge (r \Rightarrow s) \wedge (t \Rightarrow u) \Rightarrow p \wedge r \wedge t \Rightarrow q \wedge s \wedge u$
35. $(p \Leftrightarrow q) \wedge p \Rightarrow q$
36. $(\neg p \Rightarrow \neg q) \Rightarrow (\neg p \Rightarrow q) \Rightarrow p$

Użycie metody zero-jedynkowej wymaga znajomości wszystkich zmiennych zdaniowych występujących w formule. W poniższych przykładach mówimy o dowolnych formułach, nie wiemy więc jakie zmienne w nich występują i nie możemy użyć metody zero-jedynkowej.

Przykład 16. Pokażemy, że dla dowolnych formuł zdaniowych ϕ i ψ , jeśli ϕ i ψ są tautologiami, to $\phi \wedge \psi$ jest tautologią.

Weźmy dowolne formuły ϕ i ψ i załóżmy, że są one tautologiami. Weźmy dowolne wartościowanie σ . Ponieważ ϕ i ψ są tautologiami, mamy $\sigma \models \phi$ oraz $\sigma \models \psi$, a stąd $\sigma \models \phi \wedge \psi$. Zatem $\phi \wedge \psi$ jest spełniona przy każdym wartościowaniu, czyli jest tautologią.

Pokazaliśmy, że tautologie są zamknięte na koniunkcje (czyli że koniunkcja dowolnych dwóch tautologii jest tautologią). Następny przykład pokazuje, że formuły spełnialne nie mają tej własności.

Przykład 17. Istnieją takie spełnialne formuły zdaniowe ϕ i ψ , że $\phi \wedge \psi$ nie jest spełnialna.

Tutaj wystarczy po prostu wskazać takie dwie formuły. Niech $\phi = p$ i niech $\psi = \neg p$. Rozważmy takie wartościowania σ_1 i σ_2 , że $\sigma_1(p) = \text{T}$ i $\sigma_2(p) = \text{F}$. Wtedy $\sigma_1 \models \phi$, zatem ϕ jest spełnialna. Podobnie $\sigma_2 \models \psi$, zatem ψ jest spełnialna. Natomiast $\phi \wedge \psi = p \wedge \neg p$ nie jest spełnialna.

Zauważmy, że przykład 16 ma uniwersalny charakter (mówimy w nim o wszystkich formułach i wszystkich wartościowaniach), natomiast przykład 17 ma charakter egzystencjalny (mówimy w nim o istnieniu formuł i istnieniu wartościowań). W kolejnym przykładzie sytuacja jest odrobinę bardziej skomplikowana.

Przykład 18. Pokażemy, że dla dowolnych formuł zdaniowych ϕ i ψ , jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ jest spełnialna, to $\phi \wedge \neg\psi$ nie jest tautologią.

Weźmy dowolne formuły ϕ i ψ i załóżmy, że $\phi \Rightarrow \psi$ jest spełnialna. Weźmy takie wartościowanie σ , że $\sigma \models \phi \Rightarrow \psi$ i rozważmy dwa przypadki. Jeśli $\hat{\sigma}(\phi) = \text{F}$ to oczywiście $\hat{\sigma}(\phi \wedge \neg\psi) = \text{F}$ i $\sigma \not\models \phi \wedge \neg\psi$. Jeśli natomiast $\hat{\sigma}(\phi) = \text{T}$ to z faktu, że $\hat{\sigma}(\phi \Rightarrow \psi) = \text{T}$ wnioskujemy, że $\hat{\sigma}(\psi) = \text{T}$, a stąd $\hat{\sigma}(\neg\psi) = \text{F}$ i $\hat{\sigma}(\phi \wedge \neg\psi) = \text{F}$. W obu przypadkach $\sigma \not\models \phi \wedge \neg\psi$, co oznacza, że $\phi \wedge \neg\psi$ nie jest tautologią.

Zadanie 39. Niech symbole ϕ i ψ oznaczają formuły zdaniowe. Udowodnij poniższe stwierdzenia lub podaj przykłady świadczące o ich fałszywości:

1. Jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ jest tautologią i ϕ jest tautologią, to ψ jest tautologią.
2. Jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ jest spełnialna i ϕ jest spełnialna, to ψ jest spełnialna.
3. Jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ jest tautologią i ϕ jest spełnialna, to ψ jest spełnialna.
4. Jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ jest spełnialna i ϕ jest tautologią, to ψ jest spełnialna.

Zadanie 40. Które z poniższych zdań są prawdziwe dla dowolnych formuł zdaniowych ϕ i ψ ?

1. Jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ oraz $\neg\phi \Rightarrow \psi$ są tautologiami, to ψ jest tautologią.
2. Jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ oraz $\neg\phi \Rightarrow \psi$ są spełnialne, to ψ jest spełnialna.
3. Jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ jest tautologią oraz $\neg\phi \Rightarrow \psi$ jest spełnialna, to ψ jest spełnialna.
4. Jeśli $\phi \Rightarrow \psi$ jest tautologią oraz $\neg\phi \Rightarrow \psi$ jest spełnialna, to ϕ jest tautologią.

Podaj dowody ich prawdziwości. W pozostałych przypadkach wskaż kontrprzykłady.

2.2.3. Równoważność formuł

Definicja 19. Mówimy, że formuły ϕ i ψ są *równoważne*, jeśli dla każdego wartościowania przyjmują tę samą wartość logiczną.

Będziemy używać notacji $\phi \equiv \psi$ do oznaczenia, że formuły ϕ i ψ są równoważne.² Łatwo zauważyć następujący fakt.

Fakt 20. Formuły ϕ i ψ są równoważne wtedy i tylko wtedy, gdy formuła $\phi \Leftrightarrow \psi$ jest tautologią.

Przykład 21. Formuły $\neg(p \vee q)$ i $\neg p \wedge \neg q$ są równoważne.

Zadanie 41. Udowodnij, że a) dowolne dwie tautologie, b) dowolne dwie formuły sprzeczne są równoważne. Czy dowolne dwie formuły spełnialne są równoważne?

Zadanie 42. Udowodnij, że podane formuły są równoważne.

1. (prawo transpozycji prostej) $p \Rightarrow q$ oraz $\neg q \Rightarrow \neg p$
2. (prawo transpozycji złożonej) $p \wedge q \Rightarrow r$ oraz $p \wedge \neg r \Rightarrow \neg q$
3. (prawo pochłaniania) p oraz $p \vee (p \wedge q)$
4. (prawo pochłaniania) p oraz $p \wedge (p \vee q)$
5. (prawo podwójnego przeczenia) $\neg\neg p$ oraz p
6. (prawo negowania fałszu) $\neg\perp$ oraz \top
7. (prawo negowania prawdy) $\neg\top$ oraz \perp
8. (prawo De Morgana) $\neg(p \wedge q)$ oraz $\neg p \vee \neg q$
9. (prawo De Morgana) $\neg(p \vee q)$ oraz $\neg p \wedge \neg q$
10. (prawo negowania implikacji) $\neg(p \Rightarrow q)$ oraz $p \wedge \neg q$
11. (prawo negowania równoważności) $\neg(p \Leftrightarrow q)$ oraz $\neg p \Leftrightarrow q$
12. (prawo negowania równoważności) $\neg(p \Leftrightarrow q)$ oraz $p \Leftrightarrow \neg q$
13. $p \Rightarrow q$ oraz $\neg p \vee q$
14. $p \Leftrightarrow q$ oraz $(p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow p)$
15. $p \Leftrightarrow q$ oraz $(p \wedge q) \vee (\neg p \wedge \neg q)$

Równoważność przedstawionych powyżej formuł jest od dawna znana logikom, wykorzystuje się ją bowiem przeprowadzając rozumowania. W nawiasach wymieniono zwyczajowe nazwy podanych praw.

²Warto tu zauważyć, że $\phi \equiv \psi$ jest zdaniem *metajęzyka* (czyli języka, w którym mówimy o formułach) dotyczącym *dwóch* formuł, natomiast $\phi \Leftrightarrow \psi$ jest *jedną* formułą rachunku zdań.

Zadanie 43. Sprawdź, czy podane formuły są równoważne.

1. $p \vee q \Rightarrow r$ oraz $p \Rightarrow q \Rightarrow r$
2. $p \wedge q \Rightarrow r$ oraz $p \Rightarrow q \Rightarrow r$
3. $(p \Leftrightarrow q) \Rightarrow r$ oraz $p \Rightarrow q \Rightarrow r$

Zadanie 44. Sprawdź, czy podane formuły są równoważne.

1. $p \vee q$ oraz $q \vee p$
2. $p \wedge q$ oraz $q \wedge p$
3. $p \Rightarrow q$ oraz $q \Rightarrow p$
4. $p \Leftrightarrow q$ oraz $q \Leftrightarrow p$

Spójnik logiczny \oplus jest *przemienny*, jeżeli formuły $p \oplus q$ i $q \oplus p$ są równoważne. W powyższym zadaniu sprawdza się więc, które spośród spójników logicznych są przemienne.

Zadanie 45. Sprawdź, czy podane formuły są równoważne.

1. $p \vee (q \vee r)$ oraz $(p \vee q) \vee r$
2. $p \wedge (q \wedge r)$ oraz $(p \wedge q) \wedge r$
3. $p \Rightarrow (q \Rightarrow r)$ oraz $(p \Rightarrow q) \Rightarrow r$
4. $p \Leftrightarrow (q \Leftrightarrow r)$ oraz $(p \Leftrightarrow q) \Leftrightarrow r$

Spójnik logiczny \oplus jest *łączny*, jeżeli formuły $p \oplus (q \oplus r)$ i $(p \oplus q) \oplus r$ są równoważne. W powyższym zadaniu sprawdza się więc, które spośród spójników logicznych są łączne.

Zadanie 46. Sprawdź, czy podane formuły są równoważne.

1. $p \vee (q \vee r)$ oraz $q \vee (p \vee r)$
2. $p \wedge (q \wedge r)$ oraz $q \wedge (p \wedge r)$
3. $p \Rightarrow (q \Rightarrow r)$ oraz $q \Rightarrow (p \Rightarrow r)$
4. $p \Leftrightarrow (q \Leftrightarrow r)$ oraz $q \Leftrightarrow (p \Leftrightarrow r)$

Zadanie 47. Sprawdź, czy podane formuły są równoważne.

1. $p \wedge (q \vee r)$ oraz $(p \wedge q) \vee (p \wedge r)$
2. $p \wedge (q \wedge r)$ oraz $(p \wedge q) \wedge (p \wedge r)$
3. $p \wedge (q \Rightarrow r)$ oraz $(p \wedge q) \Rightarrow (p \wedge r)$

4. $p \wedge (q \Leftrightarrow r)$ oraz $(p \wedge q) \Leftrightarrow (p \wedge r)$
5. $p \vee (q \vee r)$ oraz $(p \vee q) \vee (p \vee r)$
6. $p \vee (q \wedge r)$ oraz $(p \vee q) \wedge (p \vee r)$
7. $p \vee (q \Rightarrow r)$ oraz $(p \vee q) \Rightarrow (p \vee r)$
8. $p \vee (q \Leftrightarrow r)$ oraz $(p \vee q) \Leftrightarrow (p \vee r)$
9. $p \Rightarrow (q \vee r)$ oraz $(p \Rightarrow q) \vee (p \Rightarrow r)$
10. $p \Rightarrow (q \wedge r)$ oraz $(p \Rightarrow q) \wedge (p \Rightarrow r)$
11. $p \Rightarrow (q \Rightarrow r)$ oraz $(p \Rightarrow q) \Rightarrow (p \Rightarrow r)$
12. $p \Rightarrow (q \Leftrightarrow r)$ oraz $(p \Rightarrow q) \Leftrightarrow (p \Rightarrow r)$
13. $p \Leftrightarrow (q \vee r)$ oraz $(p \Leftrightarrow q) \vee (p \Leftrightarrow r)$
14. $p \Leftrightarrow (q \wedge r)$ oraz $(p \Leftrightarrow q) \wedge (p \Leftrightarrow r)$
15. $p \Leftrightarrow (q \Rightarrow r)$ oraz $(p \Leftrightarrow q) \Rightarrow (p \Leftrightarrow r)$
16. $p \Leftrightarrow (q \Leftrightarrow r)$ oraz $(p \Leftrightarrow q) \Leftrightarrow (p \Leftrightarrow r)$

Spójnik logiczny \oplus jest *lewostronnie rozdzielny* względem spójnika \otimes , jeżeli formuły $p \oplus (q \otimes r)$ i $(p \oplus q) \otimes (p \oplus r)$ są równoważne. W powyższym zadaniu sprawdza się więc, które spośród spójników logicznych są rozdzielne względem których.

Zadanie 48. Spójnik logiczny \oplus jest *prawostronnie rozdzielny* względem spójnika \otimes , jeżeli formuły $(p \otimes q) \oplus r$ i $(p \oplus r) \otimes (q \oplus r)$ są równoważne. Które spośród spójników logicznych \vee , \wedge , \Rightarrow , \Leftrightarrow są prawostronnie rozdzielne względem których?

2.2.4. Lemat o podstawianiu

Definicja 22. *Podstawieniem* formuły ψ w miejsce zmiennej zdaniowej p nazywamy przekształcenie, które formule ϕ przyporządkowuje formułę powstałą przez wstawienie formuły ψ w miejsce każdego wystąpienia zmiennej p w formule ϕ . Formalnie:

$$\begin{aligned}
 p[p/\psi] &= \psi \\
 q[p/\psi] &= q, \quad \text{dla } q \neq p \\
 (\neg\phi)[p/\psi] &= \neg(\phi[p/\psi]) \\
 (\phi_1 \vee \phi_2)[p/\psi] &= (\phi_1[p/\psi]) \vee (\phi_2[p/\psi]) \\
 (\phi_1 \wedge \phi_2)[p/\psi] &= (\phi_1[p/\psi]) \wedge (\phi_2[p/\psi]) \\
 (\phi_1 \Rightarrow \phi_2)[p/\psi] &= (\phi_1[p/\psi]) \Rightarrow (\phi_2[p/\psi]) \\
 (\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2)[p/\psi] &= (\phi_1[p/\psi]) \Leftrightarrow (\phi_2[p/\psi])
 \end{aligned}$$

Przykład 23. $(p \Rightarrow p \vee q)[p/q \Rightarrow p] = (q \Rightarrow p) \Rightarrow (q \Rightarrow p) \vee q$.

W podobny sposób definiujemy jednoczesne podstawienie formuł w miejsce kilku zmiennych zdaniowych $[p_1/\psi_1, \dots, p_n/\psi_n]$. Jest to odwzorowanie, które formułę ϕ przyporządkowuje formułę powstałą przez wstawienie formuły ψ_i w miejsce każdego wystąpienia zmiennej p_i w formułę ϕ , dla każdego $i = 1, \dots, n$.

Lemat 24 (o podstawianiu). Niech ϕ i ψ będą formułami, niech p będzie zmienną zdaniową i niech σ będzie wartościowaniem. Niech σ' będzie wartościowaniem zdefiniowanym wzorem

$$\sigma'(q) = \begin{cases} \sigma(q), & \text{gdy } p \neq q, \\ \hat{\sigma}(\psi), & \text{gdy } p = q. \end{cases}$$

Wtedy $\hat{\sigma}(\phi[p/\psi]) = \hat{\sigma}'(\phi)$.

Wniosek. Jeżeli formuła ϕ jest tautologią, to dla dowolnej zmiennej p i dowolnej formuły ψ formuła $\phi[p/\psi]$ jest tautologią.

Wniosek ten pozwala dowodzić, że skomplikowane formuły są tautologiami. Dla przykładu formuła $(q \Rightarrow p) \Rightarrow (q \Rightarrow p) \vee q$ z przykładu 23 jest tautologią, gdyż jest wynikiem podstawienia formuły $q \Rightarrow p$ w miejsce zmiennej p w tautologii $p \Rightarrow p \vee q$.

Wniosek. Jeżeli formuły ψ i ψ' są równoważne, to dla dowolnej zmiennej p i dowolnej formuły ϕ formuły $\phi[p/\psi]$ i $\phi[p/\psi']$ są równoważne.

Powyższy wniosek ma bardzo duże znaczenie praktyczne, pozwala bowiem w dowolnie skomplikowanych formułach zamieniać dowolne podformuły na formuły im równoważne, co w szczególności umożliwia upraszczanie formuł. Dla przykładu formuły $\neg(p \Rightarrow q) \vee (p \wedge q)$ i $(p \wedge \neg q) \vee (p \wedge q)$ są równoważne, co wynika z równoważności formuł $\neg(p \Rightarrow q)$ i $(p \wedge \neg q)$ po podstawieniu ich w miejsce zmiennej r w formule $r \vee (p \wedge q)$.

W zadaniach 49–52 zbadaj, czy podane formuły są tautologiami.

Zadanie 49. $(s \wedge u \wedge t \wedge (p \vee q \vee r)) \Rightarrow (x \Rightarrow y \wedge \neg z) \Leftrightarrow ((p \vee q \vee r) \Rightarrow (s \wedge u \wedge t) \Rightarrow (x \Rightarrow y \wedge \neg z))$

Zadanie 50. $((p \Rightarrow q \wedge (r \vee s \Leftrightarrow \neg p)) \wedge \neg((p \Rightarrow q \wedge (r \vee s \Leftrightarrow \neg p))))$

Zadanie 51. $(p \wedge \neg q) \wedge ((r \Rightarrow s) \vee (p \Rightarrow q \Rightarrow r \vee \neg s)) \Rightarrow \neg(q \vee \neg p)$

Zadanie 52. $((p \Rightarrow q \vee r) \vee s \vee t) \wedge \neg(p \Rightarrow q \vee r) \Rightarrow s \vee t$

Zadanie 53. Wskaż podstawienie $[p/\phi_1, q/\phi_2, r/\phi_3]$, dla którego formuła

$$(p \vee (q \wedge r)) [p/\phi_1, q/\phi_2, r/\phi_3]$$

jest a) tautologią, b) formułą spełnialną, c) formułą sprzeczną.

2.3. Formalizacja rozumowań w języku rachunku zdań

Zadanie 54. Sformalizuj zadanie 2, tj. pokaż, jak znaleźć odpowiedzi na postawione w nim pytania korzystając z rachunku zdań.

Zadanie 55. Podczas pewnej kampanii wyborczej Olek, Józek i Kazik wygłosili następujące oświadczenia:

Olek: *Józek zawsze kłamie.*

Józek: *Kazik zawsze kłamie.*

Kazik: *Olek zawsze kłamie.*

Pokaż, że co najmniej dwóch spośród nich nie miało racji.

Zadanie 56. Podczas tej samej kampanii wyborczej Basia, Hania, Kasia i Ola stwierdziły, że:

Basia: *Hania zawsze kłamie.*

Hania: *Kasia czasem mówi prawdę.*

Kasia: *Ola czasem kłamie.*

Ola: *Basia zawsze mówi prawdę.*

Ile pań powiedziało prawdę?

Zadanie 57. Zbadaj zasadność poniższych rozumowań:

1. Jeśli stopa procentowa nie ulegnie zmianie, to wzrosną wydatki rządowe lub pojawi się bezrobocie. Jeśli wydatki rządowe nie wzrosną, to podatki zostaną obniżone. Jeśli podatki zostaną obniżone i stopa procentowa nie ulegnie zmianie, to bezrobocie się nie pojawi. Zatem wydatki rządowe wzrosną.
2. Jeśli ceny wzrosną, to spadnie popyt. Jeśli popyt spadnie, to spadną ceny. Zatem jeśli ceny wzrosną, to spadną. Zatem ceny spadną!

Zadanie 58. Rozważmy następujący fragment kodu

```

while ((i < n) ∧ ¬found) ∨ ¬interrupted do
  A
  if found
    then
      B
      if interrupted
        then C
        else D
      else E
  F
G

```

Mamy w nim siedem interesujących nas miejsc (od A do G), przy czym sam kod w tych miejscach nie jest dla nas interesujący i został pominięty. Zakładamy tylko, że zmienne i , n , $found$ i $interrupted$ mogą być zmieniane wyłącznie w miejscu F. Dla każdego z tych miejsc podaj

- warunek na dojście sterowania programu do tego miejsca, oraz
- przykład początkowych wartości zmiennych, dla których sterowanie dochodzi do tego miejsca.

Warunek powinien być napisany w postaci formuły rachunku zdań nad zbiorem zmiennych $\{(i < n), found, interrupted\}$. Na przykład dla punktu A szukany warunek to $(i < n) \wedge \neg found \vee \neg interrupted$ a wartości początkowe to np. $i = 5$, $n = 7$, $found = false$, $interrupted = false$.

Czy można na tej podstawie wskazać oczywiste błędy w tym fragmencie kodu?

2.4. Własności formuł zdaniowych

Intuicyjnie, dla $n \in \mathbb{N}$ napis $\bigwedge_{i=1}^n \phi_i$ oznacza $\phi_1 \wedge \dots \wedge \phi_n$, zaś $\bigvee_{i=1}^n \phi_i$ oznacza $\phi_1 \vee \dots \vee \phi_n$. Bardziej formalnie, napisy te są zdefiniowane indukcyjnie:

Definicja 25. $\bigwedge_{i=1}^1 \phi_i = \phi_1$, $\bigwedge_{i=1}^{n+1} \phi_i = (\bigwedge_{i=1}^n \phi_i) \wedge \phi_{n+1}$ oraz $\bigvee_{i=1}^1 \phi_i = \phi_1$, $\bigvee_{i=1}^{n+1} \phi_i = (\bigvee_{i=1}^n \phi_i) \vee \phi_{n+1}$. Przyjmujemy dodatkowo, że $\bigwedge_{i=1}^0 \phi_i$ oznacza \top , zaś $\bigvee_{i=1}^0 \phi_i$ oznacza \perp .

Definicja 26. Niech V będzie zbiorem zmiennych zdaniowych. V -literałem nazywamy formułę postaci p lub $\neg p$, gdzie $p \in V$. Jeżeli zbiór zmiennych zdaniowych jest ustalony, to formułę takiej postaci nazywamy po prostu *literałem*. Niekiedy do zbioru literałów zaliczamy też stałe logiczne \top i \perp .

Zadanie 59. Dane są formuły $\phi_1, \phi_2, \dots, \psi_1, \psi_2, \dots$. Wykaż, że dla każdego n poniższa formuła zdaniowa jest tautologią:

$$\left(\bigwedge_{i=1}^n (\phi_i \Rightarrow \psi_i) \right) \Rightarrow \left(\left(\bigvee_{i=1}^n \phi_i \right) \Rightarrow \left(\bigvee_{i=1}^n \psi_i \right) \right).$$

Zadanie 60. Dane są formuły $\phi_1, \phi_2, \dots, \psi$. Wykaż, że dla każdego n poniższa formuła zdaniowa jest tautologią:

$$\left(\bigvee_{i=1}^n (\phi_i \Rightarrow \psi) \right) \Rightarrow \left(\left(\bigwedge_{i=1}^n \phi_i \right) \Rightarrow \psi \right).$$

Zadanie 61. Czy istnieje taki nieskończony ciąg formuł $\{\phi_i\}_{i=1}^{\infty}$ rachunku zdań, że wszystkie formuły $\phi_{i+1} \Rightarrow \phi_i$ są tautologiami rachunku zdań, zaś żadna z formuł $\phi_i \Rightarrow \phi_{i+1}$ nie jest tautologią?

Zadanie 62. Czy istnieje taki nieskończony ciąg formuł $\{\phi_i\}_{i=1}^{\infty}$ rachunku zdań, że wszystkie formuły $\phi_i \Rightarrow \phi_{i+1}$ są tautologiami rachunku zdań, zaś żadna z formuł $\phi_{i+1} \Rightarrow \phi_i$ nie jest tautologią?

Zadanie 63. Udowodnij, że formuła rachunku zdań zbudowana wyłącznie ze zmiennych i spójnika równoważności „ \Leftrightarrow ” (oczywiście do jej zapisania można też używać nawiasów) jest tautologią wtedy i tylko wtedy, gdy każda zmienna występuje w niej parzystą liczbę razy.

Zadanie 64. Udowodnij, że jeśli p jest zmienną zdaniową, a ϕ taką formułą rachunku zdań, że $p \Rightarrow \phi$ i $\neg\phi \Rightarrow p$ są tautologiami, to ϕ jest tautologią.

Zadanie 65. Udowodnij, że jeśli dla wszystkich zmiennych v występujących w formule ϕ zachodzi $\sigma_1(v) = \sigma_2(v)$ to $\hat{\sigma}_1(\phi) = \hat{\sigma}_2(\phi)$.

Zadanie 66. Niech ϕ_1, \dots, ϕ_n będą formułami zdaniowymi, w których nie występują zmienne zdaniowe p_1, \dots, p_{n+1} . Udowodnij, że formuła

$$\bigwedge_{i=1}^n \phi_i$$

jest tautologią wtedy i tylko wtedy, gdy tautologią jest formuła

$$\neg p_1 \vee \bigvee_{i=1}^n (\phi_i \wedge p_i \wedge \neg p_{i+1}) \vee p_{n+1}.$$

Zadanie 67. Udowodnij, że jeżeli formuła ϕ jest tautologią, to dla dowolnych formuł ψ_1, \dots, ψ_n formuła

$$\psi_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow \psi_n \Rightarrow \phi$$

jest tautologią.

Zadanie 68. Udowodnij, że jeżeli ϕ jest formułą sprzeczną, to dla dowolnych formuł ψ_1, \dots, ψ_n formuła

$$\phi \Rightarrow \psi_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow \psi_n$$

jest tautologią.

Zadanie 69. Dla jakich $n \geq 1$ formuła

$$(\dots((p \Rightarrow p) \Rightarrow p) \Rightarrow \dots) \Rightarrow p,$$

w której zmienna p występuje n razy jest tautologią?

Zadanie 70. Niech p^0 oznacza $\neg p$ oraz niech p^1 oznacza p . Dla jakich ciągów $(i_1, \dots, i_n) \in \{0, 1\}^n$ formuła

$$(\dots((p^{i_1} \Rightarrow p^{i_2}) \Rightarrow p^{i_3}) \Rightarrow \dots) \Rightarrow p^{i_n})$$

jest tautologią?

Zadanie 71. Niech p_1, \dots, p_n będą wszystkimi zmiennymi zdaniowymi występującymi w formule ϕ . Udowodnij, że formuła ϕ jest spełnialna wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje podstawienie $[p_1/\phi_1, \dots, p_n/\phi_n]$ takie, że formuła $\phi[p_1/\phi_1, \dots, p_n/\phi_n]$ jest tautologią. Udowodnij, że formuła ϕ nie jest tautologią wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje podstawienie $[p_1/\phi_1, \dots, p_n/\phi_n]$ takie, że formuła $\phi[p_1/\phi_1, \dots, p_n/\phi_n]$ jest sprzeczna.

Zadanie 72. Dane są formuły $\phi_1, \dots, \phi_n, \psi$. Czy formuły

$$(\dots((\psi \Rightarrow \phi_1) \Rightarrow \phi_2) \Rightarrow \dots) \Rightarrow \phi_n$$

oraz

$$\psi \Rightarrow (\phi_1 \vee \phi_2 \vee \dots \vee \phi_n)$$

są równoważne?

Zadanie 73. Dane są formuły $\phi_1, \dots, \phi_n, \psi$. Czy formuły

$$\phi_1 \Rightarrow (\phi_2 \Rightarrow (\dots \Rightarrow (\phi_n \Rightarrow \psi) \dots))$$

oraz

$$(\phi_1 \wedge \phi_2 \wedge \dots \wedge \phi_n) \Rightarrow \psi$$

są równoważne?

Definicja formuł rachunku zdań (Definicja 12) prowadzi w dość oczywisty sposób do następującej zasady indukcji.

Twierdzenie 27 (zasada indukcji strukturalnej dla rachunku zdań). Niech X będzie takim zbiorem, że:

1. formuły \perp i \top należą do zbioru X ,
2. każda zmienna zdaniowa ze zbioru V należy do zbioru X ,
3. dla wszystkich formuł ϕ i ψ , jeżeli ϕ i ψ należą do zbioru X , to także $(\neg\phi)$, $(\phi \wedge \psi)$, $(\phi \vee \psi)$, $(\phi \Rightarrow \psi)$ oraz $(\phi \Leftrightarrow \psi)$ należą do zbioru X .

Wtedy zbiór $\mathcal{F}(V)$ zawiera się w zbiorze X .

W dalszej części będziemy się czasem posługiwać formułami rachunku zdań zbudowanymi w określony sposób, np. z użyciem tylko spójników \neg , \wedge i \vee . Takie formuły często mają proste definicje indukcyjne, i co za tym idzie, własne zasady indukcji strukturalnej. W przykładzie poniżej, zbiór formuł zbudowanych ze zmiennych zdaniowych i spójników \neg , \wedge i \vee moglibyśmy zdefiniować jako zbiór tych formuł rachunku zdań, w których nie występują symbole \perp , \top , \Rightarrow , \Leftrightarrow . Jednak definicja tego zbioru jako najmniejszego zbioru zawierającego zmienne zdaniowe i zamkniętego na spójniki \neg , \wedge i \vee prowadzi do prostszej zasady indukcji: *Jeśli zbiór X spełnia warunki:*

- *każda zmienna zdaniowa ze zbioru V należy do X , oraz*
- *dla wszystkich formuł ϕ i ψ , jeżeli ϕ i ψ należą do zbioru X , to także $\neg\phi$, $\phi \wedge \psi$ i $\phi \vee \psi$, należą do zbioru X ,*

to X zawiera wszystkie formuły zbudowane ze zmiennych zdaniowych z V i spójników \neg , \wedge i \vee . Dowody oparte na takiej zasadzie indukcji są prostsze od dowodów opartych na twierdzeniu 27, bo trzeba w nich rozpatrzyć mniej przypadków (nie trzeba rozpatrywać symboli \perp , \top w podstawie indukcji ani symboli \Rightarrow , \Leftrightarrow w kroku indukcyjnym).

Przykład 28. Rozważmy odwzorowanie \mathcal{T} przyporządkowujące formułom zbudowanym ze zmiennych zdaniowych oraz spójników \vee , \wedge , \neg formuły zbudowane ze zmiennych, spójników \Rightarrow , \perp w następujący sposób.

$$\begin{aligned}\mathcal{T}(p) &= p, \quad \text{dla wszystkich zmiennych } p \in V \\ \mathcal{T}(\phi \vee \psi) &= (\mathcal{T}(\phi) \Rightarrow \perp) \Rightarrow \mathcal{T}(\psi) \\ \mathcal{T}(\phi \wedge \psi) &= (\mathcal{T}(\phi) \Rightarrow (\mathcal{T}(\psi) \Rightarrow \perp)) \Rightarrow \perp \\ \mathcal{T}(\neg\phi) &= \mathcal{T}(\phi) \Rightarrow \perp\end{aligned}$$

Pokażemy, że dla wszystkich formuł ϕ zbudowanych ze zmiennych zdaniowych z V oraz spójników \vee , \wedge , \neg formuły ϕ i $\mathcal{T}(\phi)$ są równoważne.

Dowód. Przeprowadzimy dowód indukcyjny względem struktury formuły ϕ . Niech \mathcal{F} oznacza zbiór wszystkich formuł zbudowanych ze zmiennych zdaniowych z V oraz spójników \vee , \wedge , \neg i niech

$$X = \{\phi \in \mathcal{F} \mid \phi \equiv \mathcal{T}(\phi)\}.$$

Musimy pokazać, że X zawiera zmienne zdaniowe (to jest podstawa indukcji) oraz że jest zamknięty na spójniki \vee , \wedge , \neg (krok indukcyjny).

Podstawa indukcji: Rozważmy dowolną zmienną zdaniową $p \in V$. Ponieważ $\mathcal{T}(p) = p$, formuły $\mathcal{T}(p)$ oraz p są równoważne, a stąd $p \in X$.

Krok indukcyjny: Weźmy dowolne formuły ϕ i ψ i załóżmy, że $\phi, \psi \in X$ (to jest założenie indukcyjne). Pokażemy, że także $\phi \vee \psi$, $\phi \wedge \psi$ oraz $\neg\phi$ należą do zbioru X . Z założenia indukcyjnego wiemy, że $\phi \equiv \mathcal{T}(\phi)$ oraz $\psi \equiv \mathcal{T}(\psi)$.

- $\mathcal{T}(\phi \vee \psi) = (\mathcal{T}(\phi) \Rightarrow \perp) \Rightarrow \mathcal{T}(\psi)$, a zatem z założenia indukcyjnego jest to formuła równoważna $(\phi \Rightarrow \perp) \Rightarrow \psi$. Korzystając z równoważności $p \Rightarrow q \equiv \neg p \vee q$ otrzymujemy równoważną formułę $\neg(\neg\phi \vee \perp) \vee \psi$, która uprasza się do $\phi \vee \psi$. Zatem $\mathcal{T}(\phi \vee \psi) \equiv \phi \vee \psi$, co pokazuje że $\phi \vee \psi \in X$.
- Przypadek $\phi \wedge \psi$ jest podobny:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{T}(\phi \wedge \psi) &= (\mathcal{T}(\phi) \Rightarrow (\mathcal{T}(\psi) \Rightarrow \perp)) \Rightarrow \perp \\
 &\equiv (\phi \Rightarrow (\psi \Rightarrow \perp)) \Rightarrow \perp \\
 &\equiv \neg(\phi \Rightarrow (\psi \Rightarrow \perp)) \vee \perp \\
 &\equiv \phi \wedge \neg(\psi \Rightarrow \perp) \\
 &\equiv \phi \wedge (\psi \wedge \neg\perp) \\
 &\equiv \phi \wedge \psi.
 \end{aligned}$$

Zatem $\mathcal{T}(\phi \wedge \psi) \equiv \phi \wedge \psi$, co pokazuje, że $\phi \wedge \psi \in X$.

- $\mathcal{T}(\neg\phi) = \mathcal{T}(\phi) \Rightarrow \perp \equiv \phi \Rightarrow \perp \equiv \neg\phi \vee \perp \equiv \neg\phi$. Zatem $\neg\phi \in X$.

Na mocy zasady indukcji zbiór X zawiera wszystkie formuły z \mathcal{F} , a to oznacza, że dla wszystkich formuł ϕ zbudowanych ze zmiennych zdaniowych oraz spójników \vee, \wedge, \neg formuły ϕ i $\mathcal{T}(\phi)$ są równoważne. ■

Dowody indukcyjne w literaturze zwykle nie definiują explicite ani zasady indukcji, z której korzystają, ani zbioru X . W przyszłości (na wyższych latach studiów) też będziemy te definicje pomijać, musimy jednak umieć je rozpoznać i sformułować. Poniżej przykład takiego dowodu.

Przykład 29. Rozważmy formuły zbudowane ze zmiennej p i spójnika \Leftrightarrow . Pokażemy, że jeśli w takiej formule zmienna p występuje parzystą liczbę razy, to formuła ta jest tautologią.

Dowód. Rozważmy dwa wartościowania σ_F i σ_T zdefiniowane tak, że $\sigma_F(p) = F$ oraz $\sigma_T(p) = T$. Pokażemy przez indukcję, że dla każdej formuły ϕ zbudowanej ze zmiennej p i spójnika \Leftrightarrow zachodzą następujące trzy warunki.

- $\hat{\sigma}_T(\phi) = T$,
- jeśli p występuje w ϕ parzystą liczbę razy, to $\hat{\sigma}_F(\phi) = T$, oraz
- jeśli p występuje w ϕ nieparzystą liczbę razy, to $\hat{\sigma}_F(\phi) = F$.

Oczywiście teza przykładu wynika bezpośrednio z punktów (a) i (b).

Podstawa indukcji: $\phi = p$. Wtedy zmienna p występuje w ϕ nieparzystą liczbę razy, $\hat{\sigma}_F(\phi) = F$, $\hat{\sigma}_T(\phi) = T$, a zatem wszystkie trzy warunki są spełnione.

Krok indukcyjny: $\phi = \phi_1 \Leftrightarrow \phi_2$, gdzie warunki (a), (b) i (c) są spełnione dla formuł ϕ_1 i ϕ_2 . Pokażemy, że są one również spełnione dla formuły ϕ .

Warunek (a) dla ϕ jest spełniony, bo z założenia indukcyjnego $\hat{\sigma}_T(\phi_1) = T$ oraz $\hat{\sigma}_T(\phi_2) = T$, więc $\hat{\sigma}_T(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2) = T$.

Dla dowodu warunków (b) i (c) rozważmy dwa przypadki.

1. p występuje w ϕ parzystą liczbę razy. Mamy dwie możliwości

- (i) p występuje w ϕ_1 parzystą liczbę razy. Wtedy p występuje w ϕ_2 parzystą liczbę razy; z założenia indukcyjnego $\hat{\sigma}_F(\phi_1) = T$ oraz $\hat{\sigma}_F(\phi_2) = T$, więc $\hat{\sigma}_F(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2) = T$.
- (ii) p występuje w ϕ_1 nieparzystą liczbę razy. Wtedy p występuje w ϕ_2 nieparzystą liczbę razy; z założenia indukcyjnego mamy $\hat{\sigma}_F(\phi_1) = F$ oraz $\hat{\sigma}_F(\phi_2) = F$, więc $\hat{\sigma}_F(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2) = T$.

Zatem w obu przypadkach warunki (b) i (c) są spełnione.

2. p występuje w ϕ nieparzystą liczbę razy. Wtedy parzystość liczby wystąpień zmiennej p w ϕ_1 jest inna niż parzystość tych wystąpień w ϕ_2 , czyli z założenia indukcyjnego $\hat{\sigma}_F(\phi_1) \neq \hat{\sigma}_F(\phi_2)$, a więc $\hat{\sigma}_F(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2) = F$.

Zatem we wszystkich możliwych przypadkach wszystkie trzy warunki są spełnione, co kończy dowód. ■

Aby sformułować zasadę indukcji użytą w tym dowodzie, musimy najpierw zdefiniować zbiór formuł zbudowanych ze zmiennej p i spójnika \Leftrightarrow : jest to najmniejszy zbiór zawierający p i zamknięty na spójnik \Leftrightarrow . Definicja ta daje następującą zasadę indukcji: *Jeśli zbiór X spełnia warunki*

- *zmienna p należy do X , oraz*
- *dla wszystkich formuł ϕ_1 i ϕ_2 , jeżeli ϕ_1 i ϕ_2 należą do zbioru X , to także $\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2$ należy do zbioru X ,*

to X zawiera wszystkie formuły zbudowane ze zmiennej p i spójnika \Leftrightarrow . Ukryty w dowodzie zbiór X to zbiór wszystkich formuł ϕ spełniających warunki (a), (b) i (c).

Zadanie 74. Pokaż przez indukcję, że każda formuła ϕ zbudowana ze zmiennych p i q oraz spójnika \Rightarrow jest równoważna dokładnie jednej z formuł z poniższego zbioru:

$$\{T, p, q, (p \Rightarrow q), (q \Rightarrow p), (p \vee q)\}.$$

Wskazówka: W przypadku formuł zbudowanych ze zmiennych p i q oraz spójnika \Rightarrow zasada indukcji strukturalnej upraszcza się do następującego twierdzenia: *Jeśli X jest takim zbiorem formuł, że*

- *zmienne p i q należą do X , oraz*
- *dla wszystkich formuł ϕ_1 i ϕ_2 , jeżeli ϕ_1 i ϕ_2 należą do zbioru X , to także formuła $(\phi_1 \Rightarrow \phi_2)$ należy do X ,*

to X zawiera zbiór wszystkich formuł zbudowanych ze zmiennych p i q oraz spójnika \Rightarrow .

W poniższych zadaniach przyjmujemy następujące oznaczenia. Niech ϕ będzie formułą rachunku zdań zbudowaną wyłącznie ze zmiennych zdaniowych oraz spójników \vee oraz \wedge (oczywiście w składni konkretnej można używać też nawiasów). Niech ϕ^d oznacza formułę powstałą z ϕ przez zastąpienie każdego wystąpienia spójnika \vee spójnikiem \wedge , zaś każdego wystąpienia spójnika \wedge spójnikiem \vee . Niech ϕ^n oznacza formułę powstałą przez zastąpienie każdego wystąpienia zmiennej zdaniowej negacją tej zmiennej.

Zadanie 75. Udowodnij, że jeżeli formuły ϕ_1 i ϕ_2 są równoważne, to równoważne są także formuły ϕ_1^n i ϕ_2^n .

Zadanie 76. Udowodnij, że dla dowolnej formuły ϕ formuły $\neg\phi^d$ oraz ϕ^n są równoważne.

Zadanie 77. Udowodnij, że jeżeli formuły ϕ_1 i ϕ_2 są równoważne, to równoważne są także formuły ϕ_1^d i ϕ_2^d .

Zadanie 78. Wykaż, że dla każdej formuły spełnialnej ϕ ze zmiennymi ze zbioru $V = \{p, q, r\}$ istnieje formuła ψ postaci $\phi_1 \wedge \phi_2 \wedge \phi_3$ taka, że każde ϕ_i jest V -lite-
ralem, ϕ_i są parami różne oraz $\psi \Rightarrow \phi$ jest tautologią.

Zadanie 79 (lemat interpolacyjny Craiga dla rachunku zdań). Niech $V(\phi)$ oznacza zbiór zmiennych zdaniowych występujących w formule ϕ . Przypuśćmy, że ϕ i ψ są takimi formułami rachunku zdań, że $\phi \Rightarrow \psi$ jest tautologią. Udowodnij, że istnieje taka formuła ρ , że $\phi \Rightarrow \rho$ oraz $\rho \Rightarrow \psi$ są tautologiami i $V(\rho) \subseteq V(\phi) \cap V(\psi)$.

Zadanie 80 (o zamkniętym układzie twierdzeń). Niech n będzie ustaloną liczbą naturalną. Przypuśćmy, że dla pewnego wartościowania są spełnione formuły:

$$\begin{aligned} p_1 \vee \dots \vee p_n, \\ p_i \Rightarrow q_i, & \quad \text{dla } i = 1, \dots, n, \\ \neg(q_i \wedge q_j), & \quad \text{dla } 1 \leq i < j \leq n. \end{aligned}$$

Udowodnij, że wartościowanie to spełnia także formuły

$$q_i \Rightarrow p_i, \quad \text{dla } i = 1, \dots, n.$$

Przez *wartościowanie formuły* ϕ będziemy w poniższych zadaniach rozumieć odwzorowanie przyporządkowujące zmiennym występującym w tej formule wartości logiczne T i F. Formuła zawierająca n różnych zmiennych ma więc 2^n wartościowań.

Zadanie 81. Wykaż, że formuła $(\dots((p_1 \Rightarrow p_2) \Rightarrow p_3) \Rightarrow \dots \Rightarrow p_{n-1}) \Rightarrow p_n$ jest fałszywa dla dokładnie

$$\frac{2^n - (-1)^n}{3}$$

wartościowań tej formuły. Dla ilu wartościowań jest fałszywa formuła

$$p_n \Rightarrow (p_{n-1} \Rightarrow (p_{n-2} \Rightarrow \dots \Rightarrow (p_2 \Rightarrow p_1) \dots)) ?$$

Zadanie 82. Niech ϕ oraz ψ będą formułami rachunku zdań zbudowanymi wyłącznie ze zmiennych zdaniowych oraz spójników \vee oraz \wedge (oczywiście w składni konkretnej można używać nawiasów). Pokaż, że formuła $\phi \Leftrightarrow \psi$ jest spełniona przez co najmniej dwa wartościowania. Podaj przykład formuł ϕ i ψ takich, że formuła $\phi \Leftrightarrow \psi$ jest spełniona przez dokładnie dwa wartościowania.

Zadanie 83. Niech n będzie dodatnią liczbą naturalną i niech $V_n = \{p_0, \dots, p_{n-1}\}$ będzie zbiorem zmiennych zdaniowych. Przyjmijmy, że dla formuły ϕ nie zawierającej zmiennych spoza zbioru V_n napis $nv_n(\phi)$ oznacza liczbę wartościowań $\sigma : V_n \rightarrow \{T, F\}$ spełniających tę formułę. Pokaż, że dla dowolnych formuł zdaniowych ϕ oraz ψ , które nie zawierają zmiennych spoza zbioru V_n , równość

$$nv_n(\phi \vee \psi) = nv_n(\phi) + nv_n(\psi)$$

zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy $\phi \wedge \psi$ jest formułą sprzeczną.

Zadanie 84. Niech V będzie niepustym i skończonym zbiorem zmiennych zdaniowych. Znajdź zbiór wszystkich wartościowań spełniających formułę

$$\neg \bigwedge_{p, q \in V} (p \Rightarrow q).$$

2.5. Postaci normalne formuł zdaniowych

2.5.1. Usuwanie symbolu negacji

Formuły w których symbol negacji występuje przed formułą złożoną są często trudne do zrozumienia (wyrażenie „nieprawda, że liczba n dzieli się przez 2 lub

przez 3” jest bardziej skomplikowane, niż równoważne mu wyrażenie „liczba n nie dzieli się przez 2 i nie dzieli się przez 3”). *Prawa negowania formuł zdaniowych* (punkty 5–12 z zadania 42) pozwalają znaleźć dla danej formuły formułę jej równoważną, w której negacja występuje jedynie przed zmiennymi zdaniowymi. Formuły tej postaci (tzn. takie, w których negacja występuje jedynie przed zmiennymi zdaniowymi) będziemy nazywać formułami w *negacyjnej postaci normalnej* (NNF, ang. *Negation Normal Form*). Dla dowolnej formuły ϕ na mocy lematu o podstawianiu i prawa podwójnego przeczenia formuły $\neg\neg\phi$ oraz ϕ są równoważne. Na mocy lematu o podstawianiu i prawa De Morgana dla dowolnych formuł ϕ_1 i ϕ_2 formuły $\neg(\phi_1 \wedge \phi_2)$ oraz $\neg\phi_1 \vee \neg\phi_2$ są równoważne. Podobnie postępujemy dla formuł dowolnej innej postaci. Możemy zatem zdefiniować odwzorowanie T przyporządkowujące dowolnym formułom równoważne formuły, w których negacja występuje jedynie przed zmiennymi zdaniowymi:

$$\begin{aligned}
 T(p) &= p, & \text{dla } p \in V \\
 T(\perp) &= \perp \\
 T(\top) &= \top \\
 T(\phi_1 \vee \phi_2) &= T(\phi_1) \vee T(\phi_2) \\
 T(\phi_1 \wedge \phi_2) &= T(\phi_1) \wedge T(\phi_2) \\
 T(\phi_1 \Rightarrow \phi_2) &= T(\phi_1) \Rightarrow T(\phi_2) \\
 T(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2) &= T(\phi_1) \Leftrightarrow T(\phi_2) \\
 T(\neg p) &= \neg p, & \text{dla } p \in V \\
 T(\neg\perp) &= \top \\
 T(\neg\top) &= \perp \\
 T(\neg(\phi_1 \vee \phi_2)) &= T(\neg\phi_1) \wedge T(\neg\phi_2) \\
 T(\neg(\phi_1 \wedge \phi_2)) &= T(\neg\phi_1) \vee T(\neg\phi_2) \\
 T(\neg(\phi_1 \Rightarrow \phi_2)) &= T(\phi_1) \wedge T(\neg\phi_2) \\
 T(\neg(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2)) &= T(\neg\phi_1) \Leftrightarrow T(\phi_2) \\
 T(\neg\neg\phi) &= T(\phi)
 \end{aligned}$$

Fakt 30. Dla dowolnej formuły ϕ , formuły ϕ oraz $T(\phi)$ są równoważne i w formule $T(\phi)$ negacja występuje jedynie przed zmiennymi zdaniowymi.

Bezpośredni dowód Faktu 30 okazuje się zaskakująco skomplikowany i niezgrabny, z dwóch powodów. Po pierwsze, definicja odwzorowania T nie pasuje do schematu indukcji strukturalnej. W dowodach indukcyjnych chcemy dowodzić własności formuł korzystając tylko z założeń o podformułach, np. żeby dowieść czegoś

$T(p) = p, \text{ dla } p \in V$	$F(p) = \neg p, \text{ dla } p \in V$
$T(\perp) = \perp$	$F(\perp) = \top$
$T(\top) = \top$	$F(\top) = \perp$
$T(\phi_1 \vee \phi_2) = T(\phi_1) \vee T(\phi_2)$	$F(\phi_1 \vee \phi_2) = F(\phi_1) \wedge F(\phi_2)$
$T(\phi_1 \wedge \phi_2) = T(\phi_1) \wedge T(\phi_2)$	$F(\phi_1 \wedge \phi_2) = F(\phi_1) \vee F(\phi_2)$
$T(\phi_1 \Rightarrow \phi_2) = T(\phi_1) \Rightarrow T(\phi_2)$	$F(\phi_1 \Rightarrow \phi_2) = T(\phi_1) \wedge F(\phi_2)$
$T(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2) = T(\phi_1) \Leftrightarrow T(\phi_2)$	$F(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2) = F(\phi_1) \Leftrightarrow T(\phi_2)$
$T(\neg\phi) = F(\phi)$	$F(\neg\phi) = T(\phi)$

Rysunek 6. Sprowadzanie formuły do postaci NNF

o formule $\phi_1 \vee \phi_2$ chcemy korzystać tylko z własności formuł ϕ_1 i ϕ_2 ; tymczasem wartość T dla $\neg(\phi_1 \vee \phi_2)$ zależy od wartości T dla $\neg\phi_1$, która nie jest podformułą $\neg(\phi_1 \vee \phi_2)$. Żeby obejść ten problem, możemy zdefiniować T w inny, równoważny, sposób, używając dodatkowego odwzorowania F . Na rysunku 6 odwzorowania T i F definiujemy jednocześnie, przez wzajemną rekursję. W tej definicji odwołujemy się rekurencyjnie wyłącznie do podformuł, dzięki czemu łatwiej będzie użyć schematu indukcji strukturalnej. Tak zdefiniowaną funkcję łatwiej również zaimplementować.

Drugi powód trudności dowodu jest następujący: mimo że interesuje nas własność odwzorowania T , w dowodzie musimy skorzystać także z własności odwzorowania F . Mamy tu do czynienia z dość typową w matematyce sytuacją, w której żeby udało się przeprowadzić dowód, musimy wzmocnić dowodzone twierdzenie. Intuicyjnie: żeby dowód był łatwiejszy, trzeba udowodnić trudniejsze twierdzenie.

Fakt 31. Dla dowolnej formuły ϕ , (1) formuły ϕ oraz $T(\phi)$ są równoważne, (2) formuły $\neg\phi$ oraz $F(\phi)$ są równoważne, oraz (3) w formułach $T(\phi)$ i $F(\phi)$ negacja występuje jedynie przed zmiennymi zdaniowymi.

Zadanie 85. Udowodnij Fakt 31. *Wskazówka:* Pomocny może się okazać zbiór

$$X = \{\phi \in \mathcal{F}(V) \mid T(\phi) \equiv \phi \text{ oraz } F(\phi) \equiv \neg\phi\}.$$

Zadanie 86. Zaneguj formuły z zadania 38 i — korzystając z praw negowania formuł logicznych — znajdź formuły im równoważne, w których negacja występuje jedynie przed zmiennymi zdaniowymi.

Formuły w negacyjnej postaci normalnej możemy określić jako formuły zbudowane z literałów przy pomocy spójników logicznych alternatywy, koniunkcji, implikacji i równoważności. Zauważmy, że na mocy lematu o podstawianiu i punk-

tów 13–15 zadania 42 każda formuła jest równoważna pewnej formule nie zawierającej spójników implikacji i równoważności. Możemy więc rozpatrywać formuły zbudowane z literałów jedynie przy pomocy spójników alternatywy i koniunkcji. Jeszcze węższe klasy formuł rozważamy w następnych paragrafach.

2.5.2. Dysjunkcyjna postać normalna

Definicja 32. Formuła ma *dysjunkcyjną postać normalną* (DNF, ang. *Disjunctive Normal Form*), jeśli ma postać

$$\bigvee_{i=1}^n \left(\bigwedge_{j=1}^{m_i} l_{ij} \right),$$

gdzie l_{ij} są literałami; tutaj $n \in \mathbb{N}$, ponadto dla $i = 1, \dots, n$ zakładamy, że $m_i \in \mathbb{N}$ oraz $j \in \{1, \dots, m_i\}$.

Mówiąc skrótowo, dysjunkcyjna postać normalna, to alternatywa koniunkcji literałów. Zauważmy, że w szczególnych przypadkach gdy $n = 0$ lub gdy $n = 1$ i $m_1 = 0$ otrzymujemy formuły \perp i \top .

Zadanie 87. Udowodnij, że dla każdej formuły zdaniowej ϕ istnieje formuła ψ równoważna z ϕ i mająca dysjunkcyjną postać normalną.

Zadanie 88. Znajdź formuły zdaniowe ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 mające dysjunkcyjną postać normalną, zawierające zmienne p, q i r i spełnione dla podanych niżej wartościowań:

p	q	r	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
T	T	T	T	F	F
T	T	F	F	F	F
T	F	T	T	T	F
T	F	F	F	T	T
F	T	T	T	F	T
F	T	F	F	F	T
F	F	T	F	F	T
F	F	F	F	F	F

Zadanie 89. Znajdź formuły mające dysjunkcyjną postać normalną równoważne formułom z zadania 47.

Definicja 33. Formuła ma postać k -DNF, gdzie k jest liczbą naturalną, jeżeli ma postać

$$\bigvee_{i=1}^n \left(\bigwedge_{j=1}^k l_{ij} \right),$$

gdzie $n \in \mathbb{N}$ a formuły l_{ij} są literałami dla $i = 1, \dots, n$ oraz $j = 1, \dots, k$, tj. gdy jest alternatywą koniunkcji zawierających po k literałów.

Zadanie 90. Wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą postaci 1-DNF.

Zadanie 91. Dla każdego $k \geq 1$ wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą postaci k -DNF.

Definicja 34. Formuła ma postać DNF_j , gdzie j jest liczbą naturalną, jeżeli ma postać DNF i każda zmienna występuje w niej co najwyżej j razy.

Zadanie 92. Wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą postaci DNF_1 .

Zadanie 93. Dla każdego $k \geq 1$ wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą postaci DNF_k .

2.5.3. Koniunkcyjna postać normalna

Definicja 35. *Klauzulą* nazywamy formułę postaci

$$\bigvee_{j=1}^m l_j,$$

gdzie l_j są literałami, dla $j = 1, \dots, m$.

Innymi słowy klauzula to alternatywa literałów. Dla $m = 0$ powyższa definicja daje klauzulę \perp nazywaną zwyczajowo klauzulą *pustą*.

Definicja 36. Formuła ma *koniunkcyjną postać normalną* (CNF, ang. *Conjunctive Normal Form*), jeśli ma postać

$$\bigwedge_{i=1}^n \left(\bigvee_{j=1}^{m_i} l_{ij} \right),$$

gdzie $n \in \mathbb{N}$ a formuły l_{ij} są literałami dla $i = 1, \dots, n$ oraz $j = 1, \dots, m_i$, tj. gdy jest koniunkcją klauzul.

Zadanie 94. Udowodnij, że dla każdej formuły zdaniowej ϕ istnieje formuła ψ równoważna z ϕ i mająca koniunkcyjną postać normalną.

Zadanie 95. Znajdź formuły mające koniunkcyjną postać normalną równoważne formułom z zadania 88.

Zadanie 96. Znajdź formuły mające koniunkcyjną postać normalną równoważne formułom z zadania 38.

Definicja 37. Formuła ma postać k -CNF, gdzie k jest liczbą naturalną, jeżeli ma postać

$$\bigwedge_{i=1}^n \left(\bigvee_{j=1}^k l_{ij} \right),$$

gdzie $n \in \mathbb{N}$ a formuły l_{ij} są literałami dla $i = 1, \dots, n$ oraz $j = 1, \dots, k$, tj. gdy jest koniunkcją klauzul zawierających po k literałów.

Zadanie 97. Wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą postaci 1-CNF.

Zadanie 98. Dla każdego $k \geq 1$ wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą postaci k -CNF.

Definicja 38. Formuła ma postać CNF_j , gdzie j jest liczbą naturalną, jeżeli ma postać CNF i każda zmienna występuje w niej co najwyżej j razy. Formuła ma postać k - CNF_j , gdzie k i j są liczbami naturalnymi, jeżeli ma postać k -CNF i każda zmienna występuje w niej co najwyżej j razy.

Zadanie 99. Wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą postaci CNF_1 .

Zadanie 100. Dla każdego $k \geq 1$ wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą postaci CNF_k .

Definicja 39. Literał l jest *pozytywny*, jeżeli $l = p$ dla pewnej zmiennej $p \in V$. Literał l jest *negatywny*, jeżeli $l = \neg p$ dla pewnej zmiennej $p \in V$.

Definicja 40. Operację negowania literału definiujemy następująco:

$$\begin{aligned} \overline{\overline{p}} &= \neg p, \\ \overline{\neg p} &= p, \end{aligned}$$

dla dowolnego $p \in V$.

Zadanie 101. Niech $C = \bigvee_{j=1}^m l_j$ będzie dowolną klauzulą i niech

$$\begin{aligned} P &= \{j \in \{1, \dots, m\} \mid \text{litera } l_j \text{ jest pozytywny}\}, \\ N &= \{j \in \{1, \dots, m\} \mid \text{litera } l_j \text{ jest negatywny}\} \end{aligned}$$

oraz

$$C' = \bigwedge_{j \in N} \bar{l}_j \Rightarrow \bigvee_{j \in P} l_j.$$

Udowodnij, że formuły C oraz C' są równoważne.

Na mocy powyższego zadania klauzule są równoważne formułom w postaci

$$\bigwedge_{j=1}^m p_j \Rightarrow \bigvee_{j=1}^n q_j,$$

gdzie p_j i q_j są zmiennymi zdaniowymi.

Definicja 41. Klauzula $\bigvee_{j=1}^m l_j$ jest *klauzulą hornowską*, jeżeli co najwyżej jeden spośród literałów l_1, \dots, l_m jest pozytywny. Formuła ma *postać hornowską*, jeżeli jest koniunkcją klauzul hornowskich.

Klauzule hornowskie są więc równoważne formułom w postaci

$$\bigwedge_{j=1}^m p_j \Rightarrow q \quad \text{lub} \quad \bigwedge_{j=1}^m p_j \Rightarrow \perp,$$

gdzie p_j oraz q są zmiennymi zdaniowymi.

Zadanie 102. Dla wartościowań σ_1 i σ_2 oznaczmy przez $\sigma_1 \sqcap \sigma_2$ wartościowanie zadane wzorem

$$(\sigma_1 \sqcap \sigma_2)(q) = \begin{cases} \text{T}, & \text{gdy } \sigma_1(q) = \text{T i } \sigma_2(q) = \text{T}, \\ \text{F}, & \text{wpp.} \end{cases}$$

Udowodnij, że jeśli ϕ jest formułą hornowską i $\sigma_1 \models \phi$ oraz $\sigma_2 \models \phi$, to $\sigma_1 \sqcap \sigma_2 \models \phi$.

Zadanie 103. Wskaż przykład formuły, która nie jest równoważna z żadną formułą w postaci hornowskiej.

Zadanie 104. Dla których spośród formuł z zadania 38 istnieją równoważne formuły w postaci hornowskiej? Tam, gdzie to możliwe, podaj tę postać.

2.6. Funkcje boolowskie i zupełne zbiory spójników

Definicja 42. Funkcje $f : \mathcal{B}^n \rightarrow \mathcal{B}$, gdzie $\mathcal{B} = \{\text{T}, \text{F}\}$ i $n \geq 0$, nazywamy n -argumentowymi *funkcjami boolowskimi* lub *funkcjami logicznymi*.

Do tej pory zbiór spójników logicznych był ustalony (\perp , \top , \wedge , \vee , \Rightarrow , \Leftrightarrow). Nic jednak nie stoi na przeszkodzie, by rozważać różne zestawy spójników i wprowadzać nowe spójniki. Z każdym spójnikiem wiążemy jego *znaczenie* — funkcję boolowską określającą prawdziwość formuł zbudowanych przy użyciu tego spójnika. Tabelki funkcji boolowskich określających prawdziwość spójników \perp , \top , \neg , \vee , \wedge , \Rightarrow i \Leftrightarrow zostały przedstawione na rysunku 2.

Definicja 43. Formuła ϕ zbudowana ze zmiennych p_1, \dots, p_n opisuje n -argumentową funkcję boolowską f , jeżeli dla każdego wartościowania σ zmiennych p_1, \dots, p_n zachodzi:

$$f(\sigma(p_1), \dots, \sigma(p_n)) = \sigma(\phi).$$

Jeżeli formuła ϕ zbudowana ze zmiennych p_1, \dots, p_n opisuje funkcję f , to piszemy

$$f(p_1, \dots, p_n) \equiv \phi.$$

Definicja 44. Zbiór spójników logicznych jest *zupełny*, jeżeli dla wszystkich $n \geq 1$ dowolną n -argumentową funkcję boolowską można opisać za pomocą formuły zdaniowej zawierającej jedynie spójniki z tego zbioru i zmienne. Zbiór spójników jest *k-zupełny*, jeżeli każdą co najmniej 1- i co najwyżej k -argumentową funkcję boolowską można opisać za pomocą formuły zdaniowej zawierającej jedynie spójniki z tego zbioru i zmienne.

Innymi słowy zbiór spójników jest zupełny (k -zupełny), jeśli każdą funkcję boolowską (każdą funkcję boolowską co najwyżej k -argumentową) można przedstawić jako złożenie funkcji boolowskich określających znaczenie spójników z podanego zbioru.

Zadanie 105. Ile jest funkcji boolowskich n -argumentowych?

Zadanie 106. Pokaż, że $\{\vee, \wedge\}$ nie jest zupełny.

Zadanie 107. Pokaż, że $\{\vee, \wedge, \Leftrightarrow, \Rightarrow\}$ nie jest zupełny.

Zadanie 108. Pokaż, że $\{\Leftrightarrow, \perp\}$ nie jest zupełny oraz że jest 1-zupełny.

Zadanie 109. Pokaż, że $\{\wedge, \vee, \neg\}$ jest zupełny.

Zadanie 110. Pokaż, że $\{\wedge, \neg\}$ jest zupełny.

Zadanie 111. Pokaż, że $\{\vee, \neg\}$ jest zupełny.

Zadanie 112. Pokaż, że $\{\Rightarrow, \perp\}$ jest zupełny.

Zadanie 113. Pokaż, że $\{\Rightarrow, \neg\}$ jest zupełny.

Zadanie 114. Pokaż, że $\{\vee, \Leftrightarrow, \perp\}$ jest zupełny.

Zadanie 115. Udowodnij, że każdy 2-zupełny zbiór spójników jest zupełny.

Zadanie 116. Udowodnij, że zbiór $\{\vee, \wedge, \Rightarrow, \neg\}$ jest 2-zupełny.

Zadanie 117. Rozważmy unarną funkcję boolowską f_1 opisaną formułą $\neg p_1$ i binarną funkcję f_2 opisaną formułą $p_1 \wedge p_2$ oraz dowolny zbiór S . Udowodnij, że jeśli funkcje f_1 i f_2 można opisać za pomocą formuł zawierających jedynie spójniki ze zbioru S i zmienne, to zbiór S jest zupełny.

Zadanie 118. Czy system spójników $\{\oplus, \top\}$ jest zupełny, gdzie $p \oplus q$ jest prawdziwe wtedy i tylko wtedy, gdy $p \wedge \neg q$ jest prawdą, zaś \top oznacza prawdę?

Zadanie 119. Pokaż, że istnieje taki dwuargumentowy spójnik \uparrow , że $\{\uparrow\}$ jest zupełny.

Zadanie 120. Ile jest takich dwuargumentowych spójników logicznych \oplus , że $\{\oplus\}$ jest zupełny?

Zadanie 121. Niech s będzie takim spójnikiem logicznym, że $s(\top, \top) = F$. Udowodnij, że zbiór $\{s, \Rightarrow\}$ jest zupełny.

2.7. Rezolucja dla rachunku zdań

Definicja 45. *Litera*ł w rachunku zdań to zmienna zdaniowa lub negacja zmiennej zdaniowej. *Klauzula* nazywamy alternatywę skończenie wielu literałów. Alternatywę zera literałów nazywamy klauzulą pustą i oznaczamy \perp .

W tym rozdziale przyjmujemy konwencję utożsamiającą klauzulę ze zbiorem jej literałów. W szczególności klauzule $p \vee q$ i $q \vee p$, podobnie jak $p \vee p$ i p będziemy uważać za identyczne.

Definicja 46. Mówimy, że wartościowanie σ *spełnia* zbiór formuł \mathcal{F} , jeśli $\hat{\sigma}(\phi) = \top$ dla wszystkich $\phi \in \mathcal{F}$. Jeśli istnieje wartościowanie spełniające \mathcal{F} , to mówimy że \mathcal{F} jest *spełnialny*; w przeciwnym przypadku mówimy że \mathcal{F} jest *sprzeczny*. Formułę ϕ nazywamy *logiczną konsekwencją* zbioru formuł \mathcal{F} jeśli dla każdego wartościowania σ spełniającego \mathcal{F} zachodzi $\hat{\sigma}(\phi) = \top$.

Definicja 47. Jeśli C i D są klauzulami a p jest zmienną zdaniową to klauzulę $C \vee D$ nazywamy *rezolwentą* klauzul $C \vee p$ i $D \vee \neg p$. Rezolucyjnym dowodem sprzeczności zbioru \mathcal{F} nazywamy ciąg klauzul C_0, \dots, C_n spełniający warunki

- dla wszystkich $i \in \{0, \dots, n\}$ zachodzi $C_i \in \mathcal{F}$ lub istnieją takie $j, k < i$, że C_i jest rezolwentą C_j i C_k .
- $C_n = \perp$.

W różnych systemach formalnych reguły dowodzenia często zapisywane są w następującej postaci:

$$\frac{\alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_n}{\beta}$$

Formuły $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ nad poziomą kreską nazywamy *przesłankami*, a formułę β pod kreską nazywamy *konkluzją*. Wtedy dowód formuły ϕ można sobie wyobrazić jako skończone drzewo etykietowane formułami, którego korzeń ma etykietę ϕ , liście są etykietowane aksjomatami (w naszym przypadku elementami zbioru \mathcal{F}) oraz dla każdego wierzchołka, który nie jest liściem, jego etykieta jest konkluzją reguły wnioskowania, której przesłankami są etykiety następników tego wierzchołka.

Regułę rezolucji możemy zapisać w takiej postaci jako

$$\frac{C \vee p \quad D \vee \neg p}{C \vee D}$$

a rezolucyjny dowód sprzeczności zbioru formuł $\{p \vee q, \neg p \vee q, p \vee \neg q, \neg p \vee \neg q\}$ można narysować tak:

$$\frac{\frac{p \vee q \quad \neg p \vee q}{q} \quad \frac{p \vee \neg q \quad \neg p \vee \neg q}{\neg q}}{\perp}$$

W systemie rezolucji dość łatwo dowodzi się twierdzenie o poprawności (*jeśli istnieje rezolucyjny dowód sprzeczności zbioru \mathcal{F} , to zbiór \mathcal{F} jest sprzeczny*). Natomiast dowód twierdzenia o zupełności (*jeśli zbiór \mathcal{F} jest sprzeczny, to istnieje rezolucyjny dowód jego sprzeczności*) jest trudniejszy i wybiega poza ramy tego wykładu.

Zadanie 122. Udowodnij, że formuła ϕ jest logiczną konsekwencją zbioru formuł \mathcal{F} wtedy i tylko wtedy, gdy zbiór $\mathcal{F} \cup \{\neg\phi\}$ jest sprzeczny.

Zadanie 123. Udowodnij, że dla dowolnych klauzul C i D oraz dowolnej zmiennej zdaniowej p rezolwenta $C \vee D$ jest logiczną konsekwencją zbioru $\{C \vee p, D \vee \neg p\}$.

Zadanie 124. Udowodnij, że jeśli istnieje rezolucyjny dowód sprzeczności zbioru \mathcal{F} , to zbiór \mathcal{F} jest sprzeczny.

Zadanie 125. Podaj rezolucyjny dowód sprzeczności dla zbioru klauzul

$$\{\neg p \vee q, \neg p \vee \neg r \vee s, \neg q \vee r, p, \neg s\}.$$

Zadanie 126. Podaj rezolucyjny dowód sprzeczności dla zbioru klauzul

$$\{p \vee r, \neg r \vee \neg s, q \vee s, q \vee r, \neg p \vee \neg q, s \vee p\}.$$

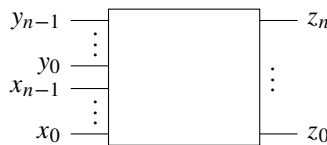
Zadanie 127. Sprawdź, czy zbiór klauzul

$$\{p \vee q \vee r, \neg r \vee \neg q \vee \neg p, \neg q \vee r, \neg r \vee p\}$$

jest sprzeczny. Jeśli jest sprzeczny, podaj dla niego rezolucyjny dowód sprzeczności. Jeśli nie jest, podaj wartościowanie spełniające ten zbiór.

2.8. Funkcje boolowskie i układy elektroniczne

Na przykładzie sumatora n -bitowego pokażemy jak funkcje boolowskie są wykorzystywane w konstrukcji układów elektronicznych. Sumator n -bitowy jest prostym układem elektronicznym o $2n$ wejściach i $n + 1$ wyjściach, który dla podanych na wejściu dwóch ciągów n -bitowych $\vec{x} = \langle x_{n-1}, \dots, x_0 \rangle$ oraz $\vec{y} = \langle y_{n-1}, \dots, y_0 \rangle$ podaje na wyjściu ciąg $\vec{z} = \langle z_n, \dots, z_0 \rangle$ będący binarną reprezentacją sumy liczb reprezentowanych przez \vec{x} i \vec{y} . Np 4-bitowy sumator dla danych na wejściu ciągów $\langle 1, 1, 0, 1 \rangle$ (liczba 13 w systemie dwójkowym) oraz $\langle 1, 1, 0, 0 \rangle$ (liczba 12 w systemie dwójkowym) powinien wyliczyć na wyjściu ciąg $\langle 1, 1, 0, 0, 1 \rangle$ (liczba 25 w systemie dwójkowym).



Rysunek 7. Sumator n -bitowy

Takie układy elektroniczne można budować z tzw *bramek logicznych*, czyli jeszcze prostszych układów elektronicznych implementujących najprostsze spójniki logiczne, np. bramek or, and i not

$$\begin{matrix} p \\ q \end{matrix} \rightarrow \text{OR symbol} \rightarrow (p \vee q)$$

$$\begin{matrix} p \\ q \end{matrix} \rightarrow \text{AND symbol} \rightarrow (p \wedge q)$$

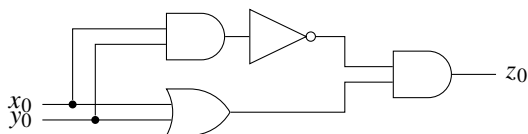
$$p \rightarrow \text{NOT symbol} \rightarrow (\neg p)$$

Oczywiście sumator 1-bitowy powinien realizować tabelkę zero-jedynkową z rysunku 8. Łatwo zauważyć, że wyjście z_0 sumatora można opisać formułą $(x_0 \vee y_0) \wedge \neg(x_0 \wedge y_0)$, odpowiedni fragment układu mamy na rysunku 9.

Zadanie 128. Jeden ze studentów zaproponował realizację wyjścia z_1 sumatora 1-bitowego za pomocą formuły $x_0 \wedge y_0 \wedge \neg((x_0 \wedge \neg y_0) \vee (\neg x_0 \wedge y_0))$.

x_0	y_0	z_1	z_0
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Rysunek 8. Tabela zero-jedynkowa dla sumatora 1-bitowego



Rysunek 9. Fragment sumatora 1-bitowego obliczający bit z_0

1. Sprawdź czy jest to poprawna definicja. Formalnie, sprawdź, czy formuła $\phi = x_0 \wedge y_0 \wedge \neg((x_0 \wedge \neg y_0) \vee (\neg x_0 \wedge y_0))$ ma następującą tabelkę zero-jedynkową.

x_0	y_0	ϕ
F	F	F
F	T	F
T	F	F
T	T	T

2. Przed przystąpieniem do masowej produkcji sumatorów chcielibyśmy ograniczyć niepotrzebne koszty i tu pojawia się pytanie czy da się zbudować moduł obliczający z_1 z mniejszej liczby bramek logicznych. Formalnie, sprawdź czy istnieje formuła o takiej tabelce zero-jedynkowej jak w poprzednim punkcie, w której występuje mniej niż 8 spójników logicznych.

Najprostszy schemat sumatora otrzymuje się z prostszych modułów odpowiedzialnych za obliczanie kolejnych bitów wyniku, tak jak w algorytmie dodawania pisemnego: do obliczenia bitu z_k trzeba zsumować bity x_k , y_k oraz bit przeniesienia p_k wynikający z sumowania poprzednich bitów (por. rysunek 10). W naszym przykładzie sumowania liczb 12 i 13 bity przeniesienia to $p_1 = 0$, $p_2 = 0$, $p_3 = 1$ i $p_4 = 1$. W następnym zadaniu mamy zaprojektować właśnie taki moduł sumujący trzy bity.

Zadanie 129. Zaprojektuj z bramek logicznych or, and i not układ elektroniczny sumujący trzy bity. Formalnie, używając tylko zmiennych zdaniowych x , y i p oraz spójników \vee , \wedge , \neg skonstruuj formuły ϕ_1, ϕ_2 o następujących tabelkach zero-jedynkowych.

$$\begin{array}{rcccc}
 p : & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{0} \\
 x : & & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 y : & + & & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 \hline
 z : & & 1 & 1 & 0 & 0 & 1
 \end{array}$$

Rysunek 10: Dodawanie pisemne liczb 12 i 13 w systemie dwójkowym. W pierwszym wierszu bity przeniesienia.

p	x	y	ϕ_1	ϕ_2
F	F	F	F	F
F	F	T	F	T
F	T	F	F	T
F	T	T	T	F
T	F	F	F	T
T	F	T	T	F
T	T	F	T	F
T	T	T	T	T

W zadaniu 106 pokazaliśmy, że zbiór $\{\vee, \wedge\}$ jest niezupełny. Rozwiązanie opierało się na obserwacji, że każda formuła zbudowana z tych spójników i zmiennych zdaniowych jest spełniona przy wartościowaniu przyporządkowującym wszystkim zmiennym prawdę. Można stąd wywnioskować, że każdy obwód elektroniczny zbudowany z bramek **and** i **or** po otrzymaniu na wejściu samych jedynek zwróci również same jedynki na wyjściu. Dlatego, mając do dyspozycji tylko bramki **and** oraz **or**, nie da się zbudować sumatora: sumator otrzymujący jedynki na wejściach x_0 i y_0 musiałby zwrócić zero na wyjściu z_0 .

W konstrukcji układów elektronicznych często korzysta się z bramek **nand** realizujących negację koniunkcji

$$\begin{array}{c} p \\ q \end{array} \text{ --- } \text{---} \neg(p \wedge q)$$

W zadaniu 120 pokazaliśmy, że $\{\text{nand}\}$ jest zupełnym zbiorem spójników. Wynika stąd, że każdą funkcję boolowską można obliczyć układem elektronicznym zbudowanym wyłącznie z bramek **nand**. A zatem można zbudować wyłącznie z takich bramek np. sumator 1024-bitowy.

2.9. System dedukcji naturalnej dla rachunku zdań

System rezolucji pozwalał na dowodzenie sprzeczności dla zbiorów klauzul. Równoważnie można powiedzieć, że służy on do dowodzenia, że podana na wejściu

formuła w dysjunkcyjnej postaci normalnej jest tautologią. Poniżej prezentujemy system, którego można użyć dla wszystkich formuł (a nie tylko tych w określonej postaci normalnej).

System dedukcji naturalnej jest formalnym systemem dowodzenia, którego intencją jest zachowanie jak największej zgodności struktury dowodów z naturalnym sposobem rozumowania w matematyce. Reguły dowodzenia podzielone są na dwie grupy: reguły wprowadzania spójników logicznych, mówiące jak dowodzi się zdań z użyciem danego spójnika, oraz reguły eliminacji spójników logicznych mówiące jakie wnioski można wyciągnąć ze zdań używających danego spójnika. Poniżej, przy każdej regule na wysokości kreski wpisujemy nazwę spójnika oraz literę i dla reguł wprowadzania (od angielskiego słowa *introduction*) lub literę e dla reguł eliminacji (od angielskiego słowa *elimination*).

Reguły dowodzenia systemu dedukcji naturalnej

Reguły wprowadzania:

$$\frac{\alpha \quad \beta}{\alpha \wedge \beta} (\wedge i) \quad \frac{\alpha}{\alpha \vee \beta} (\vee i_1) \quad \frac{\beta}{\alpha \vee \beta} (\vee i_2) \quad \top \quad (\top i)$$

$$\frac{\boxed{\begin{array}{c} \alpha \\ \vdots \\ \beta \end{array}}}{\alpha \Rightarrow \beta} (\Rightarrow i) \quad \frac{\boxed{\begin{array}{c} \alpha \\ \vdots \\ \perp \end{array}}}{\neg \alpha} (\neg i)$$

Pierwsze trzy reguły to reguły wprowadzania koniunkcji i alternatywy. Intuicyjnie są one oczywiste: aby udowodnić prawdziwość koniunkcji $\alpha \wedge \beta$ należy udowodnić prawdziwość obu formuł α oraz β , natomiast do udowodnienia prawdziwości alternatywy $\alpha \vee \beta$ wystarczy udowodnienie prawdziwości jednej z tych formuł. Reguła wprowadzania prawdy jest trywialna: formuła \top jest prawdziwa i jej dowód nie wymaga żadnych przesłanek. Nie ma reguły wprowadzania fałszu.

Więcej wyjaśnień wymagają reguły wprowadzania implikacji i negacji. W tych regułach przesłanki zamknięte w prostokątach (zwyczajowo zwanych oknami) nie są formułami tylko dowodami, a pierwsza formuła w oknie (czyli α) jest *założeniem*. Reguła wprowadzania implikacji mówi, że aby udowodnić implikację $\alpha \Rightarrow \beta$ należy założyć prawdziwość α i korzystając z tego założenia udowodnić prawdziwość β . Podobnie, aby udowodnić prawdziwość $\neg \alpha$ należy założyć prawdziwość α i korzystając z tego założenia dojść do sprzeczności. Bardzo ważna przy tym jest zasada, że założeń można używać tylko wewnątrz odpowiednich okien (założenia są lokalne, podobnie jak zmienne w programach; podobnie jak zmiennych lokalnych, nie wolno ich używać poza zasięgiem ich deklaracji). W dowolnym miejscu

dowodu wolno przyjąć nowe założenie i utworzyć nowe okno; w dowolnym miejscu wewnątrz tego okna można użyć tego założenia jak aksjomatu, ale każde założenie musi być zamknięte przez zamknięcie odpowiedniego okna.

Reguły eliminacji:

$$\begin{array}{ccc}
 \frac{\alpha \wedge \beta}{\alpha} (\wedge e_1) & \frac{\alpha \wedge \beta}{\beta} (\wedge e_2) & \frac{\alpha \vee \beta \quad \boxed{\begin{array}{c} \alpha \\ \vdots \\ \gamma \end{array}} \quad \boxed{\begin{array}{c} \beta \\ \vdots \\ \gamma \end{array}}}{\gamma} (\vee e) \\
 \frac{\alpha \quad \alpha \Rightarrow \beta}{\beta} (\Rightarrow e) & \frac{\alpha \quad \neg \alpha}{\perp} (\neg e) & \frac{\perp}{\alpha} (\perp e)
 \end{array}$$

Reguły eliminacji koniunkcji i implikacji są dość intuicyjne. Reguła eliminacji alternatywy odpowiada dowodom przez rozpatrywanie przypadków: jeśli wiemy, że zachodzi któryś z przypadków α lub β i w każdym z tych przypadków umiemy udowodnić γ , to mamy dowód prawdziwości γ . Regułę eliminacji negacji można także potraktować jako regułę wprowadzania sprzeczności: aby otrzymać sprzeczność należy udowodnić prawdziwość jednocześnie jakiejś formuły i jej negacji. Reguła eliminacji sprzeczności mówi, że z fałszu można wszystko wywnioskować — intuicyjnie odpowiada to faktowi, że dla dowolnej formuły α formuła $\perp \Rightarrow \alpha$ jest tautologią. Nie ma reguły eliminacji prawdy.

Ostatnia reguła to reguła eliminacji podwójnej negacji

$$\frac{\neg \neg \alpha}{\alpha} (\neg \neg e)$$

Jest ona konieczna np. do udowodnienia prawa wyłączonego środka mówiącego, że dla dowolnej formuły α zachodzi $\alpha \vee \neg \alpha$. Osoby zainteresowane funkcyjnymi językami programowania dowiedzą się na dalszych latach studiów, że reguła ta jest pomijana w logice intuicjonistycznej.

W literaturze można znaleźć także reguły dla równoważności, są one jednak mniej naturalne i tutaj celowo je pomijamy. Możemy myśleć o równoważności jako o skrócie notacyjnym oznaczającym dwie implikacje, tzn. dla potrzeb tego rozdziału możemy uznać, że formuła $\phi \Leftrightarrow \psi$ jest skrótem notacyjnym oznaczającym formułę $(\phi \Rightarrow \psi) \wedge (\psi \Rightarrow \phi)$.

Można udowodnić, że system dedukcji naturalnej dla rachunku zdań jest poprawny (jeśli formuła ma dowód w systemie naturalnej dedukcji to jest tautologią rachunku zdań) i zupełny (czyli każda tautologia ma dowód w tym systemie).

Przykład 48. Pokażemy w systemie naturalnej dedukcji dowód jednej implikacji z praw De Morgana: $\neg(p \vee q) \Rightarrow \neg p \wedge \neg q$.

$$\begin{array}{c}
 \neg(p \vee q) \text{ założenie} \\
 \boxed{
 \begin{array}{c}
 p \text{ założenie} \\
 \frac{p}{p \vee q} (\vee i_1) \quad \neg(p \vee q) \quad (\neg e) \\
 \hline
 \perp \\
 \hline
 \neg p \quad (\neg i)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 q \text{ założenie} \\
 \frac{q}{p \vee q} (\vee i_2) \quad \neg(p \vee q) \quad (\neg e) \\
 \hline
 \perp \\
 \hline
 \neg q \quad (\neg i)
 \end{array}
 } \\
 \hline
 \neg p \wedge \neg q \quad (\wedge i) \\
 \hline
 \neg(p \vee q) \Rightarrow \neg p \wedge \neg q \quad (\Rightarrow i)
 \end{array}$$

Powyższy dowód formalny dość łatwo tłumaczyć się na dowód w języku naturalnym: Załóżmy, że formuła $\neg(p \vee q)$ jest prawdziwa. Gdyby p było prawdą, to oczywiście $p \vee q$ także byłoby prawdą, co przeczy założeniu $\neg(p \vee q)$. Zatem $\neg p$ jest prawdą. Podobnie gdyby q było prawdą, to oczywiście $p \vee q$ także byłoby prawdą, co przeczy założeniu $\neg(p \vee q)$. Zatem $\neg q$ jest prawdą. Czyli $\neg p \wedge \neg q$ jest prawdą, co kończy dowód implikacji $\neg(p \vee q) \Rightarrow \neg p \wedge \neg q$.

Przykład 49. Pokażemy w systemie naturalnej dedukcji schemat dowodu prawa wyłączonego środka. Tutaj α jest zmienną oznaczającą dowolną formułę, a podany schemat reprezentuje nieskończenie wiele różnych dowodów (po jednym dla każdej wartości zmiennej α ; aby otrzymać konkretny dowód należy zastąpić α konkretną formułą).

$$\begin{array}{c}
 \neg(\alpha \vee \neg\alpha) \text{ założenie} \\
 \boxed{
 \begin{array}{c}
 \alpha \text{ założenie} \\
 \frac{\alpha}{\alpha \vee \neg\alpha} (\vee i_1) \quad \neg(\alpha \vee \neg\alpha) \quad (\neg e) \\
 \hline
 \perp \\
 \hline
 \neg\alpha \quad (\neg i)
 \end{array}
 } \\
 \hline
 \neg\alpha \quad (\neg i) \\
 \hline
 \neg(\alpha \vee \neg\alpha) \quad (\neg e) \\
 \hline
 \perp \\
 \hline
 \neg\neg(\alpha \vee \neg\alpha) \quad (\neg i) \\
 \hline
 \alpha \vee \neg\alpha \quad (\neg\neg e)
 \end{array}$$

Zadanie 130. Podaj w systemie dedukcji naturalnej dowód implikacji $\neg(p \wedge q) \Rightarrow \neg p \vee \neg q$. *Wskazówka:* możesz skorzystać z prawa wyłączonego środka. Tej implikacji nie da się udowodnić konstruktywnie (tzn. bez użycia reguły eliminacji podwójnej negacji).

Zadanie 131. Podaj w systemie dedukcji naturalnej dowody wszystkich, z wyjątkiem $p \Leftrightarrow p$ oraz prawa Peirce’a, tautologii z zadania 37.

Zadanie 132. Podaj w systemie dedukcji naturalnej dowód prawa Peirce’a.

Wskazówka: Tego nie da się zrobić konstruktywnie; trzeba użyć reguły eliminacji podwójnej negacji lub prawa wyłączonego środka.

Zadanie 133. Podaj w systemie dedukcji naturalnej schemat dowodu reguły wnioskowania przez kontrapozycję, czyli implikacji

$$(\neg\psi \Rightarrow \neg\phi) \Rightarrow (\phi \Rightarrow \psi)$$

dla dowolnych formuł rachunku zdań ϕ i ψ .

Wskazówka: Tego również nie da się zrobić konstruktywnie.

Zadanie 134. Pan Hilary zgubił swoje okulary i w ich poszukiwaniu stwierdza następujące fakty:

- Jeśli czytałem gazetę w kuchni (α) to okulary są na stole kuchennym (β).
- Jeśli okulary są na stole kuchennym (β), to widziałem je podczas śniadania (γ).
- Nie widziałem okularów podczas śniadania ($\neg\gamma$).
- Czytałem gazetę w kuchni (α) lub w sypialni (δ).
- Jeśli czytałem gazetę w sypialni (δ) to okulary są na łóżku (ϵ).

Pomóż panu Hilaremu i udowodnij w systemie naturalnej dedukcji, że okulary są na łóżku, czyli że

$$(\alpha \Rightarrow \beta) \wedge (\beta \Rightarrow \gamma) \wedge \neg\gamma \wedge (\alpha \vee \delta) \wedge (\delta \Rightarrow \epsilon) \Rightarrow \epsilon$$

jest tautologią.

Zadanie 135. Podaj w systemie dedukcji naturalnej dowód rozdzielności alternatywy względem koniunkcji, czyli dwóch implikacji

$$\alpha \vee (\beta \wedge \gamma) \Rightarrow (\alpha \vee \beta) \wedge (\alpha \vee \gamma)$$

oraz

$$(\alpha \vee \beta) \wedge (\alpha \vee \gamma) \Rightarrow \alpha \vee (\beta \wedge \gamma).$$

Zadanie 136. Rozważmy fragment systemu dedukcji naturalnej zawierający wyłącznie reguły wprowadzania i eliminacji implikacji. Udowodnij, że każda formuła dowodliwa w tym fragmencie jest tautologią.³

³Właściwie w tym miejscu spodziewalibyśmy się zadania polegającego na udowodnieniu twierdzenia, że każda formuła dowodliwa w systemie dedukcji naturalnej jest tautologią. Wydaje się jednak, że takie zadanie nie byłoby ani ciekawsze ani trudniejsze, a tylko bardziej nużące.

Wskazówka. W rozwiązaniu tego zadania wygodnie jest użyć innej notacji dla dowodów w systemie naturalnej dedukcji. Zamiast rysowania okien, w których widoczne są założenia ze zbioru Γ i dowodzona jest formuła ϕ można napisać tzw. *sekwent* $\Gamma \vdash \phi$ (co czytamy w *środowisku* Γ *dowodliwa jest formuła* ϕ). W tej notacji zasada mówiąca, że można używać tylko założeń znajdujących się wewnątrz odpowiednich okien, przyjmuje postać aksjomatu $\Gamma \cup \{\phi\} \vdash \phi$, natomiast reguły wprowadzania i eliminacji implikacji to

$$\frac{\Gamma \cup \{\phi\} \vdash \psi}{\Gamma \vdash \phi \Rightarrow \psi} (\Rightarrow i) \quad \text{oraz} \quad \frac{\Gamma \vdash \phi \quad \Gamma \vdash \phi \Rightarrow \psi}{\Gamma \vdash \psi} (\Rightarrow e)$$

W takiej notacji dowód sekwentu $\Gamma \vdash \phi$ jest drzewem etykietowanym sekwentami. Drzewo to ma w korzeniu etykietę $\Gamma \vdash \phi$, jego liście są etykietowane aksjomatami, a dla każdego wierzchołka, który nie jest liściem, jego etykieta jest konkluzją, a etykiety jego następników — przesłankami instancji jednej z reguł wnioskowania. Oto przykład kompletnego dowodu w tej notacji:

$$\frac{\frac{\frac{\{p, (p \Rightarrow q)\} \vdash p \quad \{p, (p \Rightarrow q)\} \vdash p \Rightarrow q}{\{p, (p \Rightarrow q)\} \vdash q} (\Rightarrow e)}{\{p\} \vdash (p \Rightarrow q) \Rightarrow q} (\Rightarrow i)}{\emptyset \vdash p \Rightarrow (p \Rightarrow q) \Rightarrow q} (\Rightarrow i)$$

Jest to dowód sekwentu $\emptyset \vdash p \Rightarrow (p \Rightarrow q) \Rightarrow q$.

Rozwiązanie zadania polega na pokazaniu, że dla każdego drzewa dowodu, jeśli w jego korzeniu znajduje się sekwent $\Gamma \vdash \phi$, to ϕ jest logiczną konsekwencją Γ . Rozumowanie to można łatwo przeprowadzić za pomocą indukcji strukturalnej względem drzewa dowodu. Kluczowa jest obserwacja, że zbiór drzew dowodu to najmniejszy zbiór zawierający liście i zamknięty na reguły dowodzenia.

Rachunek kwantyfikatorów

3.1. Składnia rachunku kwantyfikatorów

Definicja 50. W rachunku kwantyfikatorów używamy tzw. *zmiennych indywidualnych* pochodzących z nieskończonego zbioru $X = \{x, y, z, x_1, x_2, \dots\}$, *symboli funkcyjnych* f, g, f_1, f_2, \dots i *symboli relacyjnych* p, q, p_1, p_2, \dots . Z każdym symbolem funkcyjnym i z każdym symbolem relacyjnym związujemy liczbę naturalną, która określa liczbę jego argumentów (*arność*). Symbole funkcyjne 0-argumentowe nazywamy *symbolami statych*. Symbole relacyjne można uważać za uogólnienie zmiennych zdaniowych z rachunku zdań (zmienne zdaniowe, to 0-argumentowe symbole relacyjne).

Termy są drzewami postaci $x, f(x), g(f_1(x), f_2(x))$ itp. Formalnie:

1. Każda zmienna indywidualna jest termem.
2. Każdy symbol stałej jest termem.
3. Jeśli t_1, \dots, t_n są termami, a f jest n -argumentowym ($n > 0$) symbolem funkcyjnym, to $f(t_1, \dots, t_n)$ jest termem.
4. Każdy term można zbudować przy pomocy reguł 1–3.

Formuły atomowe są drzewami postaci $p(t_1), q(t_1, t_2)$ itp., gdzie t_1 i t_2 są termami. Formalnie:

1. Symbole \perp i \top są formułami atomowymi.
2. Każdy 0-argumentowy symbol relacyjny jest formułą atomową.
3. Jeśli t_1, \dots, t_n są termami, a p jest n -argumentowym ($n > 0$) symbolem relacyjnym, to $p(t_1, \dots, t_n)$ jest formułą atomową.
4. Każdą formułę atomową można otrzymać przy pomocy reguł 1–3.

Formuły rachunku kwantyfikatorów (które będziemy oznaczać ϕ, ψ, \dots) budujemy z *formuł atomowych* za pomocą *spójników logicznych* w sposób podobny, jak w rachunku zdań. Ponadto możemy używać kwantyfikatorów \forall i \exists .

Formalnie:

1. Każda formuła atomowa jest formułą rachunku kwantyfikatorów.
2. Jeżeli ϕ_1 i ϕ_2 są formułami rachunku kwantyfikatorów, to są nimi także: $(\neg\phi_1)$, $(\phi_1 \wedge \phi_2)$, $(\phi_1 \vee \phi_2)$, $(\phi_1 \Rightarrow \phi_2)$ i $(\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2)$.
3. Jeżeli x jest zmienną indywiduową, a ϕ — formułą rachunku kwantyfikatorów, to formułami rachunku kwantyfikatorów są też $(\forall x \phi)$ i $(\exists x \phi)$.
4. Każdą formułę rachunku kwantyfikatorów można otrzymać przy pomocy reguł 1–3.

Dla zwiększenia czytelności w składni konkretnej opuszczamy niektóre nawiasy w podobny sposób, jak w rachunku zdań, a niektóre symbole funkcyjne lub relacyjne piszemy infiksowo. Niestety w literaturze można spotkać różne konwencje dotyczące priorytetu kwantyfikatorów; nawet w naszym instytucie nie ma zgody, czy napis „ $\forall x \phi(x) \Rightarrow \psi(y)$ ” oznacza $(\forall x \phi(x)) \Rightarrow \psi(y)$ czy $\forall x (\phi(x) \Rightarrow \psi(y))$, a nie są to formuły równoważne. Dlatego będziemy się starali używać nawiasów tam, gdzie mogą wystąpić wątpliwości. Czasem będziemy korzystać także z innej konwencji, w której po kwantyfikatorze można napisać kropkę zastępującą nawias — wtedy kwantyfikator wiąże słabiej niż wszystkie pozostałe spójniki i w szczególności zapis $\forall x. \phi(x) \Rightarrow \psi(y)$ oznacza $\forall x (\phi(x) \Rightarrow \psi(y))$.

Definicja 51. Mówimy, że w formule $\forall x \phi$ (lub $\exists x \phi$) kwantyfikator \forall (lub \exists) wiąże wystąpienia zmiennej x w formule ϕ , oraz że wystąpienia zmiennej x w formule ϕ są związane przez ten kwantyfikator. Wystąpienie zmiennej pod kwantyfikatorem nazywamy *wiązącym*. Wystąpienia zmiennych, które w danej formule nie są związane ani wiążące, są w niej *wolne*. Formalnie zbiór $FV(\phi)$ zmiennych, które występują jako wolne w formule ϕ definiujemy następująco:

$$\begin{aligned}
 FV(x) &= \{x\} \\
 FV(f(t_1, \dots, t_n)) &= FV(t_1) \cup \dots \cup FV(t_n) \\
 FV(\perp) &= \emptyset \\
 FV(\top) &= \emptyset \\
 FV(p(t_1, \dots, t_n)) &= FV(t_1) \cup \dots \cup FV(t_n) \\
 FV(\neg\phi) &= FV(\phi) \\
 FV(\phi \circ \psi) &= FV(\phi) \cup FV(\psi), \quad \text{gdzie } \circ \in \{\vee, \wedge, \Rightarrow, \Leftrightarrow\} \\
 FV(Qx \phi) &= FV(\phi) \setminus \{x\}, \quad \text{gdzie } Q \in \{\forall, \exists\}
 \end{aligned}$$

Podobnie definiujemy zbiór zmiennych występujących w formule jako związane. Formułę bez zmiennych wolnych nazywamy *zdaniem*.

Przyjmujemy konwencję, że $\forall \phi(x)\psi$ oznacza $\forall x(\phi(x) \Rightarrow \psi)$ oraz $\exists \phi(x)\psi$ oznacza $\exists x(\phi(x) \wedge \psi)$.

Definicja 52. Dla dowolnej formuły α napis $\alpha[x/t]$ oznacza wynik podstawienia termu t w każde wolne wystąpienie x w α . Podstawienie $[x/t]$ jest *dopuszczalne* w α , jeśli w wyniku tego podstawienia żadna zmienna z t nie staje się związana, tj. żadne wolne wystąpienie x w α nie znajduje się w zasięgu żadnego kwantyfikatora wiążącego zmienną występującą w t .

Dla przykładu, podstawienie $[x/y]$ jest niedopuszczalne w formule $\exists y \ x < y$. Formuła ta jest prawdziwa w zbiorze liczb rzeczywistych dla dowolnego ustalonego x , natomiast wynikiem podstawienia w niej y w miejsce x byłaby fałszywa formuła $\exists y \ y < y$.

Zadanie 137. Wskaż wolne, wiążące i związane wystąpienia zmiennych w formułach z zadania 173. Narysuj w tych formułach strzałki od wystąpień zmiennych związanych do wystąpień wiążących te zmienne.

3.2. Znaczenie formuł rachunku kwantyfikatorów

Formalna definicja *tautologii* (formuły prawdziwej, prawa rachunku kwantyfikatorów) jest nieco bardziej skomplikowana, niż w przypadku rachunku zdań. Z tego powodu podamy ją dopiero w rozdziale 13. Tutaj powiemy jedynie, że formuła ϕ jest tautologią, jeżeli jest spełniona w każdym niepustym zbiorze przy każdej interpretacji symboli funkcyjnych i relacyjnych. Przy danej interpretacji symboli funkcyjnych i relacyjnych formuła $\forall x \phi$ jest spełniona, gdy jest spełniona formuła ϕ dla każdej wartości zmiennej x , zaś formuła $\exists x \phi$ jest spełniona, gdy istnieje pewna wartość zmiennej x , dla której formuła ϕ jest spełniona.

Przykład 53. Prawami rachunku kwantyfikatorów są np. *prawa negowania kwantyfikatorów*:

$$\neg(\forall x \phi) \Leftrightarrow \exists x \neg\phi$$

$$\neg(\exists x \phi) \Leftrightarrow \forall x \neg\phi$$

Ich intuicyjny sens jest jasny: „nieprawda, że dla każdego x formuła ϕ jest prawdziwa” oznacza, że „*istnieje* x , dla którego formuła ϕ nie jest prawdziwa.” Podobnie „nieprawda, że *istnieje* x , dla którego formuła ϕ jest prawdziwa” oznacza, że „dla każdego x formuła ϕ nie jest prawdziwa.”

Przykład 54. Niech ϕ i ψ oznaczają formuły rachunku kwantyfikatorów być może zawierające wolne wystąpienia zmiennej x . Wtedy

$$(\forall x (\phi \wedge \psi)) \Leftrightarrow (\forall x \phi) \wedge (\forall x \psi)$$

$$(\exists x (\phi \vee \psi)) \Leftrightarrow (\exists x \phi) \vee (\exists x \psi)$$

są prawami rachunku kwantyfikatorów.

Przykład 55. Niech ϕ i ψ oznaczają takie formuły rachunku kwantyfikatorów, że zmienna x nie ma wolnych wystąpień w formule ϕ (lecz może mieć w ψ). Wtedy

$$\begin{aligned} (\forall x (\phi \vee \psi)) &\Leftrightarrow (\phi \vee \forall x \psi) \\ (\forall x (\phi \wedge \psi)) &\Leftrightarrow (\phi \wedge \forall x \psi) \\ (\exists x (\phi \vee \psi)) &\Leftrightarrow (\phi \vee \exists x \psi) \\ (\exists x (\phi \wedge \psi)) &\Leftrightarrow (\phi \wedge \exists x \psi) \end{aligned}$$

są prawami rachunku kwantyfikatorów.

3.3. System dedukcji naturalnej dla rachunku kwantyfikatorów

System dedukcji naturalnej, który poznaliśmy w poprzednim rozdziale, daje się rozszerzyć na rachunek kwantyfikatorów. Nowe reguły dowodzenia to reguły wprowadzania i eliminacji dla obu kwantyfikatorów. Napis $\alpha[x/t]$ oznacza formułę, w której wszystkie wolne wystąpienia zmiennej x zostały zastąpione przez wystąpienia termu t .

Reguły wprowadzania:

$$\frac{\alpha[x/t]}{\exists x \alpha} (\exists i) \qquad \frac{\begin{array}{c} x_0 \\ \vdots \\ \alpha[x/x_0] \end{array}}{\forall x \alpha} (\forall i)$$

Reguła wprowadzania kwantyfikatora egzystencjalnego jest intuicyjna: aby udowodnić prawdziwość $\exists x \alpha$ wystarczy wskazać takie t , dla którego α zachodzi; t może być tutaj dowolnym termem (pod warunkiem, że podstawienie $[x/t]$ jest dopuszczalne w α). W regule wprowadzania kwantyfikatora ogólnego potrzebujemy dodatkowego założenia, że x_0 jest świeżą zmienną — zmienną lokalną, widoczną tylko wewnątrz okna, w którym została zadeklarowana. Reguła ta odpowiada następującej technice dowodzenia: *Weźmy dowolne x_0 i pokażmy, że α zachodzi dla tego x_0 . Z dowolności wyboru x_0 wnioskujemy, że α zachodzi dla wszystkich x .*

Reguły eliminacji:

$$\frac{\exists x \alpha \quad \begin{array}{c} x_0 \quad \alpha[x/x_0] \\ \vdots \\ \beta \end{array}}{\beta} (\exists e) \qquad \frac{\forall x \alpha}{\alpha[x/t]} (\forall e)$$

W regule eliminacji kwantyfikatora egzystencjalnego znowu mamy założenie, że x_0 jest świeżą zmienną. Odpowiada to takiemu argumentowi: *Skoro wiemy, że zachodzi $\exists x \alpha$, to niech x_0 będzie takim elementem, dla którego zachodzi α* . Reguła eliminacji kwantyfikatora ogólnego mówi natomiast, że *skoro α zachodzi dla wszystkich x , to w szczególności zachodzi dla t* . Trzeba przy tym podkreślić, że zmienna x_0 może występować tylko wewnątrz okna, w którym została zadeklarowana (nie może występować np. wcześniej w dowodzie), natomiast t może być dowolnym termem (pod warunkiem, że podstawienie $[x/t]$ jest dopuszczalne, tzn. t nie zawiera zmiennych związanych w α) i zwykle występuje w innych miejscach dowodu.

Przykład 56. Poniżej prezentujemy schemat dowodu implikacji $(\forall x (\phi \wedge \psi)) \Rightarrow (\forall x \phi) \wedge (\forall x \psi)$ w systemie naturalnej dedukcji.

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\begin{array}{c} \forall x (\phi \wedge \psi) \text{ założenie} \\ \\ \begin{array}{|l} \hline x_0 \text{ świeża zmienna} \\ \hline \frac{\forall x (\phi \wedge \psi)}{\phi[x/x_0] \wedge \psi[x/x_0]} (\forall e) \\ \hline \phi[x/x_0] (\wedge e_1) \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|l} \hline x_1 \text{ świeża zmienna} \\ \hline \frac{\forall x (\phi \wedge \psi)}{\phi[x/x_1] \wedge \psi[x/x_1]} (\forall e) \\ \hline \psi[x/x_1] (\wedge e_2) \\ \hline \end{array} \\ \\ \frac{}{\forall x \phi} (\forall i) \quad \frac{}{\forall x \psi} (\forall i) \\ \hline (\forall x \phi) \wedge (\forall x \psi) (\wedge i) \end{array}} \\
 \hline
 (\forall x (\phi \wedge \psi)) \Rightarrow (\forall x \phi) \wedge (\forall x \psi) (\Rightarrow i)
 \end{array}$$

Kolejny przykład to schemat dowodu jednej z implikacji jednego z praw De Morgana.

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\begin{array}{c} \neg \exists x \phi \text{ założenie} \\ \\ \begin{array}{|l} \hline x_0 \text{ świeża zmienna} \\ \hline \begin{array}{|l} \hline \phi[x/x_0] \text{ założenie} \\ \hline \frac{\phi[x/x_0]}{\exists x \phi} (\exists i) \quad \neg \exists x \phi (\neg e) \\ \hline \perp \\ \hline \end{array} \\ \hline \neg \phi[x/x_0] (\neg i) \\ \hline \forall x \neg \phi (\forall i) \end{array} \end{array}} \\
 \hline
 \neg \exists x \phi \Rightarrow \forall x \neg \phi (\Rightarrow i)
 \end{array}$$

W języku naturalnym ten dowód można przeczytać tak: *Założmy, że $\neg \exists x \phi$ jest prawdą i weźmy dowolne x_0 . Gdyby ϕ dla $x = x_0$ było prawdą, to istniałby taki x ,*

dla którego ϕ zachodzi, co przeczy prawdziwości $\neg\exists x \phi$. Zatem $\neg\phi(x_0)$ jest prawdą. Z dowolności wyboru x_0 wnioskujemy, że $\forall x \neg\phi$ jest prawdą, co kończy dowód.

W powyższych przykładach ϕ i ψ były zmiennymi oznaczającymi dowolne formuły. W następnym przykładzie p jest symbolem relacyjnym, co trochę upraszcza notację, bo zamiast $p(x)[x/x_0]$ możemy po prostu napisać $p(x_0)$.

Przykład 57. Pokażemy dowód formuły $(\exists x p(x)) \Rightarrow \neg\forall x.\neg p(x)$ w systemie naturalnej dedukcji.

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\begin{array}{c} \exists x p(x) \text{ założenie} \\ \\ \boxed{\begin{array}{c} \forall x \neg p(x) \text{ założenie} \\ \\ \boxed{\begin{array}{c} x_0 \text{ świeża zmienna; } p(x_0) \text{ założenie} \\ \frac{\forall x \neg p(x)}{\neg p(x_0)} (\forall e) \quad \frac{p(x_0)}{\perp} (\neg e) \\ \hline \perp \end{array}} \\ \hline \perp \quad (\exists e) \end{array}} \\ \hline \neg\forall x \neg p(x) \quad (\neg i) \end{array}
 \end{array}$$

$$\overline{(\exists x p(x)) \Rightarrow \neg\forall x.\neg p(x)} \quad (\Rightarrow i)$$

Zadanie 138. Podaj w systemie dedukcji naturalnej schemat dowodu drugiej implikacji powyższego prawa De Morgana, czyli implikacji $(\forall x \neg\phi) \Rightarrow \neg\exists x \phi$.

Zadanie 139. Podaj w systemie dedukcji naturalnej schemat dowodu implikacji $(\exists x \neg\phi) \Rightarrow \neg\forall x \phi$.

Zadanie 140. Podaj w systemie dedukcji naturalnej schemat dowodu implikacji $\neg(\forall x \phi) \Rightarrow \exists x \neg\phi$.

Wskazówka: Tego się nie da zrobić w sposób konstruktywny. Trzeba skorzystać z prawa wyłącznego środka lub z eliminacji podwójnej negacji.

Niech ϕ i ψ oznaczają formuły rachunku kwantyfikatorów być może zawierające wolne wystąpienia zmiennej x . W poniższych zadaniach sprawdź, które z podanych formuł są prawami rachunku kwantyfikatorów.

Zadanie 141. $(\forall x (\phi \vee \psi)) \Rightarrow (\forall x \phi) \vee (\forall x \psi)$

Zadanie 142. $(\forall x \phi) \vee (\forall x \psi) \Rightarrow (\forall x (\phi \vee \psi))$

Zadanie 143. $(\forall x (\phi \wedge \psi)) \Rightarrow (\forall x \phi) \wedge (\forall x \psi)$

Zadanie 144. $((\forall x \phi) \Rightarrow (\forall x \psi)) \Rightarrow (\forall x (\phi \Rightarrow \psi))$

Zadanie 145. $(\forall x (\phi \Rightarrow \psi)) \Rightarrow (\exists x \phi) \Rightarrow (\forall x \psi)$

Zadanie 146. $((\exists x \phi) \Rightarrow (\forall x \psi)) \Rightarrow (\forall x (\phi \Rightarrow \psi))$

Zadanie 147. $(\exists x \phi) \wedge (\exists x \psi) \Rightarrow (\exists x (\phi \wedge \psi))$

Zadanie 148. $(\exists x (\phi \wedge \psi)) \Rightarrow (\exists x \phi) \wedge (\exists x \psi)$

Zadanie 149. $((\exists x \phi) \Rightarrow (\exists x \psi)) \Rightarrow (\exists x (\phi \Rightarrow \psi))$

Zadanie 150. $(\exists x (\phi \Rightarrow \psi)) \Rightarrow (\exists x \phi) \Rightarrow (\exists x \psi)$

Zadanie 151. $(\forall x \phi) \Rightarrow ((\exists x \psi) \Rightarrow (\exists x (\phi \Rightarrow \psi)))$

Zadanie 152. $(\exists x (\phi \Rightarrow \psi)) \Rightarrow (\forall x \phi) \Rightarrow (\exists x \psi)$

Zadanie 153. $((\forall x \phi) \Leftrightarrow \neg(\forall x \psi)) \Rightarrow \exists x (\phi \Leftrightarrow \neg\psi)$

Zadanie 154. $(\exists x (\phi \Leftrightarrow \neg\psi)) \Rightarrow ((\forall x \phi) \Leftrightarrow \neg(\forall x \psi))$

Zadanie 155. $(\forall x \phi) \Rightarrow \exists x \phi$

Zadanie 156. $(\exists x \phi) \Rightarrow \forall x \phi$

Niech ϕ oznacza formułę rachunku kwantyfikatorów zawierającą być może wolne wystąpienia zmiennych x i y . W poniższych zadaniach sprawdź, które z podanych formuł są prawami rachunku kwantyfikatorów.

Zadanie 157. $(\forall x \exists y \phi) \Rightarrow (\exists y \forall x \phi)$

Zadanie 158. $(\exists y \forall x \phi) \Rightarrow (\forall x \exists y \phi)$

Niech ϕ i ψ oznaczają formuły rachunku kwantyfikatorów, przy czym zmienna x nie ma wolnych wystąpień w formule ϕ (lecz może mieć w ψ). W poniższych zadaniach sprawdź, czy podane formuły są równoważne.

Zadanie 159. $\forall x (\phi \Rightarrow \psi)$ oraz $\phi \Rightarrow (\forall x \psi)$

Zadanie 160. $\forall x (\phi \Rightarrow \psi)$ oraz $\phi \Rightarrow (\exists x \psi)$

Zadanie 161. $\forall x (\psi \Rightarrow \phi)$ oraz $(\forall x \psi) \Rightarrow \phi$

Zadanie 162. $\forall x (\psi \Rightarrow \phi)$ oraz $(\exists x \psi) \Rightarrow \phi$

Zadanie 163. $\forall x (\phi \Leftrightarrow \psi)$ oraz $\phi \Leftrightarrow (\forall x \psi)$

Zadanie 164. $\forall x (\phi \Leftrightarrow \psi)$ oraz $\phi \Leftrightarrow (\exists x \psi)$

Zadanie 165. $\exists x (\phi \Rightarrow \psi)$ oraz $\phi \Rightarrow (\exists x \psi)$

Zadanie 166. $\exists x (\phi \Rightarrow \psi)$ oraz $\phi \Rightarrow (\forall x \psi)$

Zadanie 167. $\exists x (\psi \Rightarrow \phi)$ oraz $(\exists x \psi) \Rightarrow \phi$

Zadanie 168. $\exists x (\psi \Rightarrow \phi)$ oraz $(\forall x \psi) \Rightarrow \phi$

Zadanie 169. $\exists x (\phi \Leftrightarrow \psi)$ oraz $\phi \Leftrightarrow (\exists x \psi)$

Zadanie 170. $\exists x (\phi \Leftrightarrow \psi)$ oraz $\phi \Leftrightarrow (\forall x \psi)$

3.4. Formalizacja wypowiedzi w języku rachunku kwantyfikatorów

Zadanie 171. Następująca formuła mówi, że funkcja $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ jest *ciągła*.

$$\forall x_0 \in \mathbb{R} \forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} (|x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(x_0)| < \epsilon).$$

Nie używając znaku negacji zapisz formułę „funkcja f nie jest ciągła.”

Zadanie 172. Następująca formuła mówi, że liczba $g \in \mathbb{R}$ jest *granica* (w sensie Cauchy’ego) funkcji $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ w punkcie x_0 .

$$\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} (0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - g| < \epsilon).$$

Nie używając znaku negacji zapisz formułę „liczba g nie jest granicą funkcji f w punkcie x_0 .”

Formuła ϕ jest w *postaci normalnej*¹, jeśli jest postaci $Q_1 x_1 \dots Q_n x_n \psi$, gdzie x_i są pewnymi zmiennymi, Q_i są kwantyfikatorami ($Q_i \in \{\forall, \exists\}$ dla $i = 1, \dots, n$), a formuła ψ nie zawiera kwantyfikatorów i symbol negacji występuje w niej jedynie przed formułami atomowymi. Przykładem formuły w postaci normalnej jest $\forall x \exists y (x \neq y \vee \neg x \leq y)$. Formuła $\forall x \exists y \exists z \neg (z = y \vee y = z)$ nie jest w postaci normalnej, podobnie jak $\forall x > 0 \exists y x = y$.

Zadanie 173. Dla każdej z formuł poniżej podaj równoważną formułę w postaci normalnej.

¹W literaturze mówi się o formułach, w których wszystkie kwantyfikatory są na początku, że są w *pre-nejksowej* postaci normalnej. Tutaj dodatkowo wymagamy, aby formuła ψ była w negacyjnej postaci normalnej.

$$1. \forall x_0 \in \mathbb{R} \forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} (|x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(x_0)| < \epsilon)$$

$$2. \forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} (0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - g| < \epsilon)$$

Zadanie 174. Funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ jest *słabo rosnąca*, jeśli prawdziwa jest formuła

$$\forall x \forall y (x \leq y \Rightarrow f(x) \leq f(y)).$$

Funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ jest *słabo malejąca*, jeśli prawdziwa jest formuła

$$\forall x \forall y (x \leq y \Rightarrow f(y) \leq f(x)).$$

Zapisz poniższe zdania jako formuły w postaci normalnej:

1. funkcja f jest słabo rosnąca i słabo malejąca,
2. funkcja f nie jest słabo rosnąca i nie jest słabo malejąca.

Zadanie 175. Przy pomocy zmiennych, stałych 0 i 1, symboli $=, \leq, +, \times$, spójników logicznych i kwantyfikatorów zapisz następujące formuły dotyczące liczb naturalnych:

1. liczba x jest najmniejszą wspólną wielokrotnością y i z ,
2. każda liczba nieparzysta większa od 3 jest sumą dwóch liczb pierwszych,
3. nie istnieje największa liczba pierwsza,
4. liczby x i y mają takie same dzielniki pierwsze.

Wskaż zmienne wolne i związane w tych formułach.

Wskazówka: Możesz definiować makra podobne do makr z języka C. Np. możesz zdefiniować makro $\text{dzielnik}(x, y)$ jako $\exists d. x \times d = y$. Wtedy formułę „ x jest wspólnym dzielnikiem y i z ” zapiszemy jako $\text{dzielnik}(x, y) \wedge \text{dzielnik}(x, z)$.

Zadanie 176. Niech funkcja g będzie dla $n \in \mathbb{N}$ określona następująco:

$$g(n) = \begin{cases} n/2, & \text{gdy } n \text{ jest parzyste,} \\ 3n + 1, & \text{gdy } n \text{ jest nieparzyste.} \end{cases}$$

Używając symboli z zadania 175 oraz dodatkowo symbolu potęgowania \uparrow , zapisz zdanie równoważne zdaniu „dla każdej liczby naturalnej m istnieje taka liczba n , że $g^n(m) = 1$ ”, gdzie g^n oznacza funkcję g złożoną ze sobą n razy, na przykład $g^2(3) = 5$. *Wskazówka:* skończony ciąg liczb naturalnych a_1, a_2, \dots, a_m możemy zakodować jako jedną liczbę $2^{a_1} 3^{a_2} \dots p_m^{a_m}$, gdzie p_i jest i -tą liczbą pierwszą; mogą się przydać formuły wyrażające własności „ $g(x) = y$ ” oraz „ p i q są kolejnymi liczbami pierwszymi”.

Zadanie 177. Używając tylko kwantyfikatorów, zmiennych, nawiasów, spójników logicznych oraz symboli $0, 1, 2, \in, \mathbb{N}, +, \times, =$ i \leq napisz formułę mówiącą, że wśród każdych trzech liczb naturalnych zawsze znajdują się dwie, których różnica jest nieujemna i parzysta. Czy taką formułę można zapisać używając wyłącznie kwantyfikatorów, zmiennych, nawiasów, spójników logicznych oraz symboli $\in, \mathbb{N}, +$ i $=$?

Używając tylko kwantyfikatorów, zmiennych, nawiasów, spójników logicznych oraz symboli $\in, \mathbb{N}, +, \times, =, <$ i symbolu f napisz formułę mówiącą, że jeśli funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ jest silnie rosnąca (dla większych argumentów ma większe wartości), to jej wartości są nieograniczone.

Zadanie 178. Liczbę naturalną q nazywamy *liczbą bliźniaczą*, jeżeli liczby q oraz $q + 2$ są pierwsze. Używając symboli $+, \times, 0, 1, 2, =$ oraz nawiasów, zmiennych, kwantyfikatorów i spójników logicznych zapisz formalnie zdanie: „Istnieje największa liczba bliźniacza taka, że pomiędzy nią a poprzednią liczbą bliźniaczą jest co najwyżej jedna liczba pierwsza.”

Zadanie 179. Niech na pewnym skończonym zbiorze X będzie określona binarna relacja R . Mówimy, że zbiór X z relacją R jest *hamiltonowski*, jeśli istnieje taki ciąg elementów zbioru X , że każdy element zbioru X występuje w tym ciągu dokładnie raz, każde dwa kolejne elementy ciągu są ze sobą w relacji R , oraz ostatni element ciągu jest w relacji z pierwszym elementem ciągu. Używając jedynie poniższych słów i zwrotów (z odpowiednią odmianą) wyraż słownie, co to znaczy, że zbiór X wraz z relacją R nie jest hamiltonowski:

R	istnieje	pierwszy
X	każdy	raz
ciąg	kolejny	taki, że
dla	który	ten
dokładnie	lub	truskawka
dwa	moc	w
element	nie jest w relacji	występować
i	ostatni	zbiór

Zadanie 180. Po egzaminie z logiki studenci wybrali się na dyskotekę, w której bawi się pewna liczba pań i dżentelmenów. Niech

- ϕ_1 oznacza, że każdy dżentelmen zna co najwyżej dwie panie,
- ϕ_2 oznacza, że każda pani zna co najwyżej dwóch dżentelmenów,
- ϕ_3 oznacza, że każdy dżentelmen zna co najmniej dwie panie,
- ϕ_4 oznacza, że żadne dwie panie nie znają dokładnie tych samych dżentelmenów.

Zapisz zdania ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 i ϕ_4 używając symboli P , D oraz Z , gdzie

$P(x)$	oznacza, że x jest panią,
$D(x)$	oznacza, że x jest dżentelmenem,
$Z(x, y)$	oznacza, że x zna y ,

oraz równości $=$ i spójników logicznych oraz kwantyfikatorów.

4

Zbiory

W teorii mnogości *zbiór* i *relację* \in należenia do zbioru przyjmujemy za pojęcia pierwotne. Własności zbiorów i relacji \in są zadane przez *aksjomaty*, tj. zdania, które przyjmujemy za prawdziwe bez dowodu.

Aksjomat 58 (zasada ekstensjonalności). Dwa zbiory są *równe*, jeżeli zawierają dokładnie te same elementy, tj. $A = B$ wtedy i tylko wtedy, gdy prawdziwa jest formuła

$$\forall x (x \in A \Leftrightarrow x \in B).$$

Definicja 59. *Zbiór pusty* \emptyset jest zbiorem nie zawierającym żadnego elementu. Prawdziwa jest formuła

$$\forall x (x \notin \emptyset).$$

Aksjomat 60 (zbioru pustego). Zbiór pusty istnieje.

Zauważmy, że na mocy zasady ekstensjonalności istnieje dokładnie jeden zbiór pusty.

Nie będziemy tu wymieniać wszystkich aksjomatów teorii mnogości. Aksjomaty gwarantują między innymi istnienie zbioru potęgowego (Definicja 65), sumy zbiorów (Definicje 66 i 71) czy zbioru liczb naturalnych, ale nie będziemy wchodzić w szczegółowe rozważania na ten temat. Zainteresowanych czytelników odsyłamy do podręczników do teorii mnogości wymienionych w rozdziale B.

Definicja 61. Zbiór A jest *podzbiorem* zbioru B , co będziemy zapisywać $A \subseteq B$, jeżeli B zawiera wszystkie elementy zbioru A , tj. zachodzi

$$\forall x (x \in A \Rightarrow x \in B).$$

Zauważmy, że na mocy zasady ekstensjonalności dwa zbiory są równe wtedy i tylko wtedy, gdy są nawzajem swoimi podzbiarami, tj. $A = B$ wtedy i tylko wtedy, gdy $A \subseteq B$ oraz $B \subseteq A$.

Przykład 62. Pokażemy, że dla dowolnego zbioru A zachodzi inkluzja $\emptyset \subseteq A$.

Dowód. Niech A będzie dowolnym zbiorem. Z definicji zawierania wystarczy pokazać, że dla wszystkich x , jeśli $x \in \emptyset$, to $x \in A$. Weźmy więc dowolne x . Przez kontrapozycję wystarczy pokazać, że jeśli $x \notin A$ to $x \notin \emptyset$. Załóżmy więc, że $x \notin A$. Z definicji zbioru pustego mamy $x \notin \emptyset$, co kończy dowód. ■

W powyższym dowodzie skorzystaliśmy z niekonstruktywnej reguły wnioskowania przez kontrapozycję (porównaj zadanie 133): zamiast dowodzić implikacji $x \in \emptyset \Rightarrow x \in A$ udowodniliśmy $x \notin A \Rightarrow x \notin \emptyset$. Implikację $x \in \emptyset \Rightarrow x \in A$ można także udowodnić konstruktywnie, choć dowód jest mniej intuicyjny: Załóżmy, że $x \in \emptyset$. Z definicji zbioru pustego mamy $x \notin \emptyset$, co daje sprzeczność, a z niej wynika, że $x \in A$.

Definicja 63. Napisy $\{x \mid \phi\}$ i $\{x : \phi\}$ oznaczają zbiór tych elementów x , które spełniają formułę ϕ . Będziemy również pisać $x \in A \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \phi$ zamiast $A = \{x \mid \phi\}$ oraz $\{f(x) \mid \phi\}$ zamiast $\{y \mid \exists x \phi \wedge (y = f(x))\}$.

W ogólnym przypadku zbiór $\{x \mid \phi\}$ wcale nie musi istnieć, jednak w niniejszej książeczce nie spotkamy się z taką sytuacją i nie będziemy wchodzić w szczegółowe rozważania na ten temat. Zainteresowanych czytelników zachęcamy do zapoznania się z antynomią Russella i jej konsekwencjami.

Przykład 64. Napis $\{n \mid \exists m \in \mathbb{N} (n = 3m)\}$ oznacza zbiór liczb naturalnych podzielnych przez 3. Ten sam zbiór możemy krócej zapisać jako $\{3m \mid m \in \mathbb{N}\}$.

Definicja 65. Zbiór, którego elementy są zbiorami, nazywamy *rodziną zbiorów*. Rodzinę wszystkich podzbiorów zbioru A nazywamy *zbiorem potęgowym* zbioru A i oznaczamy $\mathcal{P}(A)$. Możemy napisać:

$$\mathcal{P}(A) = \{B \mid B \subseteq A\}.$$

4.1. Działania na zbiorach

Definicja 66. Na zbiorach wprowadzamy operacje *sumy* \cup , *przekroju* \cap i *różnicy* \setminus :

$$\begin{aligned} x \in A \cup B & \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} x \in A \vee x \in B \\ x \in A \cap B & \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} x \in A \wedge x \in B \\ x \in A \setminus B & \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} x \in A \wedge x \notin B \end{aligned}$$

Powyższe operacje mają wiele ciekawych własności. Dla przykładu:

Fakt 67 (prawa rozdzielności).

$$\begin{aligned} A \setminus (B \cup C) &= (A \setminus B) \cap (A \setminus C) \\ A \setminus (B \cap C) &= (A \setminus B) \cup (A \setminus C) \\ A \cap (B \cup C) &= (A \cap B) \cup (A \cap C) \\ A \cup (B \cap C) &= (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{aligned}$$

Udowodnimy pierwsze z nich.

Dowód. Na mocy prawa ekstensjonalności wystarczy pokazać, że dla każdego x zachodzi

$$x \in A \setminus (B \cup C) \Leftrightarrow x \in (A \setminus B) \cap (A \setminus C).$$

Równoważność tę pokażemy rozpoczynając od formuły $x \in A \setminus (B \cup C)$, przechodząc przez szereg formuł równoważnych i kończąc na $x \in (A \setminus B) \cap (A \setminus C)$. Z definicji różnicy zbiorów wiemy, że formuła

$$x \in A \setminus (B \cup C)$$

jest równoważna formule

$$x \in A \wedge \neg(x \in B \cup C).$$

Następnie korzystając z definicji sumy zbiorów otrzymujemy równoważną formułę

$$x \in A \wedge \neg(x \in B \vee x \in C).$$

Korzystając z prawa De Morgana $\neg(p \vee q) \Leftrightarrow \neg p \wedge \neg q$ otrzymujemy

$$x \in A \wedge (x \notin B \wedge x \notin C).$$

Na mocy tautologii $p \Leftrightarrow (p \wedge p)$ możemy do formuły dopisać jeszcze jedno wystąpienie $x \in A$.

$$x \in A \wedge x \in A \wedge (x \notin B \wedge x \notin C).$$

Ponadto koniunkcja jest łączna i przemienne, możemy zatem dowolnie pogrupować jej czynniki:

$$(x \in A \wedge x \notin B) \wedge (x \in A \wedge x \notin C).$$

Korzystając dwukrotnie z definicji różnicy zbiorów dostajemy

$$(x \in A \setminus B) \wedge (x \in A \setminus C).$$

Na mocy definicji przekroju zbiorów mamy ostatecznie

$$x \in (A \setminus B) \cap (A \setminus C).$$

Twierdzenie jest zatem udowodnione. ■

Czysto syntaktyczne przekształcanie formuł (czyli mechaniczne rachunki na formułach bez zastanawiania się, co te formuły oznaczają) takie jak w powyższym dowodzie czasem okazuje się kłopotliwe. Rozumowanie semantyczne, oparte na znaczeniu formuł, często jest wygodniejsze i mniej podatne na błędy. Następujący przykład ilustruje tę metodę.

Przykład 68. Pokażemy, że dla dowolnych zbiorów A , B i C zachodzi inkluzja

$$(A \cup B) \setminus C \subseteq A \cup (B \setminus C).$$

Dowód. Rozważmy dowolne zbiory A , B i C oraz dowolny element x i załóżmy, że $x \in (A \cup B) \setminus C$. Z definicji sumy i różnicy zbiorów otrzymujemy wtedy, że $x \in A$ lub $x \in B$, oraz że $x \notin C$. Rozważmy teraz dwa przypadki.

Przypadek 1: $x \in A$. W tym przypadku oczywiście $x \in A \cup (B \setminus C)$.

Przypadek 2: $x \in B$. W tym przypadku z warunku $x \notin C$ wnioskujemy, że $x \in (B \setminus C)$, a stąd $x \in A \cup (B \setminus C)$.

W obu (czyli we wszystkich możliwych) przypadkach otrzymaliśmy, że $x \in A \cup (B \setminus C)$, a to kończy dowód naszej inkluzji. ■

Przykład 69. Pokażemy, że dla dowolnych zbiorów A , B i C zachodzi implikacja jeśli $A \cap B = A \cap C$ oraz $A \cup B = A \cup C$, to $B = C$.

Dowód. Załóżmy, że $A \cap B = A \cap C$ oraz $A \cup B = A \cup C$. Do dowodu, że $B = C$ wystarczy pokazać dwie inkluzje: $B \subseteq C$ oraz $C \subseteq B$. Pokażemy najpierw, że $B \subseteq C$. Weźmy więc dowolne $x \in B$ i rozważmy dwa przypadki:

1: $x \in A$. W tym przypadku $x \in A \cap B$, z równości $A \cap B = A \cap C$ otrzymujemy $x \in A \cap C$, a stąd $x \in C$.

2: $x \notin A$. W tym przypadku $x \in A \cup B$, z równości $A \cup B = A \cup C$ otrzymujemy $x \in A \cup C$ i z faktu, że $x \notin A$ wnioskujemy, że $x \in C$.

W obu przypadkach otrzymaliśmy $x \in C$, co kończy dowód inkluzji $B \subseteq C$.

Dowód inkluzji $C \subseteq B$ jest symetryczny: wystarczy w dowodzie inkluzji $B \subseteq C$ zamienić miejscami wszystkie wystąpienia B i C . ■

Zadanie 181. Pokaż, że dla dowolnych zbiorów A , B i C zachodzą podane równości.

$$\begin{aligned} A \cup B &= B \cup A \\ A \cap B &= B \cap A \\ (A \cup B) \cup C &= A \cup (B \cup C) \\ (A \cap B) \cap C &= A \cap (B \cap C) \end{aligned}$$

$$(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C)$$

$$(A \cap B) \cup C = (A \cup C) \cap (B \cup C)$$

$$(A \cup B) \setminus C = (A \setminus C) \cup (B \setminus C)$$

$$A \setminus (B \cup C) = (A \setminus B) \setminus C$$

$$(A \cap B) \setminus C = (A \setminus C) \cap (B \setminus C)$$

$$A \setminus (B \cap C) = (A \setminus B) \cup (A \setminus C)$$

Zadanie 182. Pokaż, że dla dowolnych zbiorów A, B, C i D zachodzą podane równości.

$$(A \setminus B) \cup C = (A \cup C) \setminus (B \setminus C)$$

$$(A \setminus B) \cap C = (A \cap C) \setminus B$$

$$A \setminus (B \setminus C) = (A \setminus B) \cup (A \cap C)$$

$$A \cup (B \setminus C) = ((A \cup B) \setminus C) \cup (A \cap C)$$

$$A \setminus (B \setminus (C \setminus D)) = (A \setminus B) \cup ((A \cap C) \setminus D)$$

$$(A \setminus B) \cap (C \setminus D) = (A \cap C) \setminus (B \cup D)$$

$$\emptyset \cap A = \emptyset$$

$$\emptyset \cup A = A$$

$$\emptyset \setminus A = \emptyset$$

$$A \setminus \emptyset = A$$

Zadanie 183. Czy dla dowolnych zbiorów A, B i C zachodzą podane równości?

$$(A \cup B) \setminus B = A$$

$$A \cup (A \cap B) = A$$

$$A \cap (A \cup B) = A$$

$$(A \setminus B) \setminus (B \setminus A) = A$$

$$A \setminus (B \cap A) = A$$

$$A \setminus (B \setminus A) = A$$

$$A \cup (B \setminus C) = (A \cup B) \setminus C$$

$$A \cap (B \setminus C) = (A \cap B) \setminus C$$

$$A \setminus (B \setminus C) = (A \setminus B) \setminus C$$

$$A \setminus (B \cup C) = (A \setminus B) \cap (A \setminus C)$$

Zadanie 184. Pokaż, że dla dowolnych takich zbiorów A, B, C i D , że $A \subseteq B$ i $C \subseteq D$ zachodzą podane inkluzje.

$$A \cup C \subseteq B \cup D$$

$$A \cap C \subseteq B \cap D$$

$$A \setminus D \subseteq B \setminus C$$

Zadanie 185. Wykaż, że dla dowolnych zbiorów A, B, C i D zachodzi:

$$A \cap B \cap C \cap D \subseteq ((A \cap B) \cup C) \cap D.$$

Zadanie 186. Czy dla dowolnych zbiorów A, B i C zachodzą poniższe inkluzje?

$$A \cap (B \cup C) \subseteq B \cap (A \cup C)$$

$$A \cap (B \setminus C) \subseteq B \cap (A \setminus C)$$

W zadaniach 187–192 przyjmij, że zbiory A, B i C spełniają podaną równość. Spośród sześciu inkluzji $A \subseteq B$, $A \subseteq C$, $B \subseteq A$, $B \subseteq C$, $C \subseteq A$ i $C \subseteq B$ wymień wszystkie, które wynikają z podanej zależności i udowodnij, że wymienileś wszystkie takie inkluzje.

Zadanie 187. $(A \cup B) \setminus C = (A \setminus C) \cup B$

Zadanie 188. $(A \cup B) \setminus (B \cap C) = A \cap C$

Zadanie 189. $((A \cap B) \cup C) \setminus A = (A \cap B) \setminus C$

Zadanie 190. $(A \setminus C) \cup B = A \cup B$

Zadanie 191. $(A \cap B) \cup (C \cap B) = B$

Zadanie 192. $(A \cup B) \cap (C \cup B) = B$

Zadanie 193. Pokaż, że jeżeli dla pewnych zbiorów A i B jest $A \setminus B = B \setminus A$, to $A = B$.

Zadanie 194. Udowodnij, że dla dowolnych zbiorów A i B następujące formuły są równoważne

$$A \subseteq B, \quad A \cup B = B, \quad A \cap B = A, \quad A \setminus B = \emptyset.$$

Zadanie 195. Niech A, B i C będą dowolnymi zbiorami. Udowodnij, że $A \subseteq A \cup B$ i $B \subseteq A \cup B$. Udowodnij, że jeśli $A \subseteq C$ oraz $B \subseteq C$, to $A \cup B \subseteq C$. Innymi słowy suma zbiorów A i B jest najmniejszym (w sensie inkluzji) zbiorem zawierającym zbiory A i B .

Zadanie 196. Niech A, B i C będą dowolnymi zbiorami. Udowodnij, że $A \cap B \subseteq A$ i $A \cap B \subseteq B$. Udowodnij, że jeśli $C \subseteq A$ oraz $C \subseteq B$, to $C \subseteq A \cap B$. Innymi słowy przekrój zbiorów A i B jest największym (w sensie inkluzji) zbiorem zawartym w zbiorach A i B .

Zadanie 197. Niech A , B i C będą dowolnymi zbiorami. Udowodnij, że $A \setminus B \subseteq A$ i $(A \setminus B) \cap B = \emptyset$. Udowodnij, że jeśli $C \subseteq A$ oraz $C \cap B = \emptyset$, to $C \subseteq A \setminus B$. Innymi słowy różnica zbiorów A i B jest największym (w sensie inkluzji) zbiorem zawartym w A i rozłącznym z B .

Definicja 70. *Różnicę symetryczną* $\dot{-}$ zbiorów A i B definiujemy następująco:

$$x \in A \dot{-} B \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} x \in A \Leftrightarrow x \notin B.$$

Zadanie 198. Pokaż, że różnica symetryczna jest operacją *łączną* i *przemienneą*, tj. że

$$(A \dot{-} B) \dot{-} C = A \dot{-} (B \dot{-} C) \quad \text{oraz} \quad A \dot{-} B = B \dot{-} A$$

dla dowolnych zbiorów A , B i C . Pokaż także następujące tożsamości:

$$A \dot{-} \emptyset = A, \quad A \dot{-} A = \emptyset \quad \text{oraz} \quad A \cap (B \dot{-} C) = (A \cap B) \dot{-} (A \cap C).$$

Zadanie 199. Udowodnij, że

$$A \dot{-} B = (A \setminus B) \cup (B \setminus A) = (A \cup B) \setminus (A \cap B).$$

Zadanie 200. Wśród poniższych zdań wskaż zdania prawdziwe i udowodnij je. Dla pozostałych zdań podaj kontrprzykłady dowodzące, że zdania te nie są prawdziwe.

1. Równość $A \cap B = A \cap C$ implikuje równość $B = C$.
2. Równości $A \cap B = A \cap C$ oraz $A \cup B = A \cup C$ implikują równość $B = C$.
3. Inkluzja $A \cup B \subseteq A \cap B$ implikuje równość $A = B$.
4. Równość $A \dot{-} B = A \dot{-} C$ implikuje równość $B = C$.
5. Równość $A \dot{-} B = \emptyset$ implikuje równość $A = B$.

Zadanie 201. Czy istnieją niepuste zbiory A i B takie, że

$$A \subseteq A \dot{-} B \subseteq A \setminus B?$$

Zadanie 202. Czy dla dowolnych zbiorów A i B zachodzą równości:

$$\begin{aligned} A \cup (B \dot{-} C) &= (A \cup B) \dot{-} (A \cup C), \\ A \cup B &= (A \dot{-} B) \dot{-} (A \cap B)? \end{aligned}$$

4.2. Operacje nieskończone na zbiorach

Dwuargumentowe operacje sumy i przekroju zbiorów można rozszerzyć na dowolne rodziny zbiorów.

Definicja 71. Suma wszystkich zbiorów z rodziny \mathcal{A} jest zbiorem zawierającym elementy występujące w którymkolwiek ze zbiorów rodziny \mathcal{A} . Podobnie przekrój tej rodziny jest zbiorem zawierającym elementy występujące w każdym zbiorze rodziny \mathcal{A} . Formalnie:

$$\begin{aligned}\bigcup \mathcal{A} &= \{x \mid \exists X \in \mathcal{A} (x \in X)\}, \\ \bigcap \mathcal{A} &= \{x \mid \forall X \in \mathcal{A} (x \in X)\}.\end{aligned}$$

Czasem chcielibyśmy nazwać zbiory należące do rodziny zbiorów tak, aby móc wykonywać na nich pewne operacje. Służą do tego *indeksowane rodziny zbiorów*.

Definicja 72. Rodziną zbiorów indeksowaną elementami zbioru S nazywamy odwzorowanie, które każdemu elementowi $s \in S$ przyporządkowuje pewien zbiór A_s . Taką rodzinę oznaczamy $\{A_s\}_{s \in S}$ lub $\{A_s \mid s \in S\}$. Rodziną zbiorów $\{A_{s,t}\}_{s \in S, t \in T}$ indeksowaną elementami dwóch zbiorów S i T nazywamy odwzorowanie, które każdej parze $\langle s, t \rangle$, gdzie $s \in S$ oraz $t \in T$ przyporządkowuje pewien zbiór $A_{s,t}$. Jeżeli $S = \{i \in \mathbb{N} \mid i \geq n\}$, to zamiast $\{A_i\}_{i \in S}$ piszemy też $\{A_i\}_{i=n}^{\infty}$. Jeżeli $S = \{n, \dots, m\}$, to zamiast $\{A_i\}_{i \in S}$ piszemy też $\{A_i\}_{i=n}^m$.

Operacje sumy i przekroju w oczywisty sposób uogólniają się na indeksowane rodziny zbiorów. Suma wszystkich zbiorów z rodziny $\{A_s\}_{s \in S}$ jest zbiorem zawierającym elementy występujące w którymkolwiek ze zbiorów A_s . Podobnie przekrój tej rodziny jest zbiorem zawierającym elementy występujące w każdym ze zbiorów A_s . Formalnie:

$$\begin{aligned}x \in \bigcup_{s \in S} A_s &\stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \exists s \in S (x \in A_s), \\ x \in \bigcap_{s \in S} A_s &\stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \forall s \in S (x \in A_s).\end{aligned}$$

Zadanie 203. Rozważmy zbiór $A_{s,t} = \{x \in \mathbb{R} \mid s \leq x \wedge x \leq t\}$, gdzie $s, t \in \mathbb{R}$ są dowolnymi liczbami. Dla każdego ze zbiorów poniżej wylicz jego wartość.

1. $\bigcup_{t \geq 2} A_{0,t}$
2. $\bigcap_{t \geq 2} A_{1,t}$

3. $\bigcup_{t \geq 2} A_{s,t}$
4. $\bigcap_{t \geq 2} A_{s,t}$
5. $\bigcup_{s < 0} \bigcap_{t \geq 2} A_{s,t}$
6. $\bigcap_{s < 0} \bigcup_{t \geq 2} A_{s,t}$

W poniższych zadaniach udowodnij, że dla dowolnych rodzin zbiorów $\{A_t\}_{t \in T}$, $\{B_t\}_{t \in T}$, gdzie T jest niepustym zbiorem indeksów, zachodzą podane relacje. W których przypadkach zachodzi inkluzja odwrotna?

Zadanie 204. $\bigcup_{t \in T} (A_t \cup B_t) = \bigcup_{t \in T} A_t \cup \bigcup_{t \in T} B_t$

Zadanie 205. $\bigcap_{t \in T} (A_t \cap B_t) = \bigcap_{t \in T} A_t \cap \bigcap_{t \in T} B_t$

Zadanie 206. $\bigcup_{t \in T} (A_t \cap B_t) \subseteq \bigcup_{t \in T} A_t \cap \bigcup_{t \in T} B_t$

Zadanie 207. $\bigcap_{t \in T} A_t \cup \bigcap_{t \in T} B_t \subseteq \bigcap_{t \in T} (A_t \cup B_t)$

Zadanie 208. $\bigcap_{t \in T} A_t \cup \bigcap_{t \in T} B_t \subseteq \bigcup_{t \in T} (A_t \cup B_t)$

Zadanie 209. $\bigcap_{t \in T} (A_t \cup B_t) \subseteq \bigcup_{t \in T} A_t \cup \bigcup_{t \in T} B_t$

Zadanie 210. $\bigcap_{t,s \in T} (A_t \cup B_s) \subseteq \bigcap_{t \in T} (A_t \cup B_t)$

Zadanie 211. $\bigcup_{t \in T} (A_t \cap B_t) \subseteq \bigcup_{t,s \in T} (A_t \cap B_s)$

Zadanie 212. $\bigcup_{t \in T} (A_t \setminus B_t) \subseteq \bigcup_{t \in T} A_t \setminus \bigcap_{t \in T} B_t$

Zadanie 213. $\bigcap_{t \in T} (A_t \setminus B_t) = \bigcap_{t \in T} A_t \setminus \bigcup_{t \in T} B_t$

W poniższych zadaniach udowodnij, że dla dowolnego zbioru A i dowolnej rodziny zbiorów $\{B_t\}_{t \in T}$, gdzie T jest niepustym zbiorem indeksów, zachodzą podane równości.

Zadanie 214. $\bigcup_{t \in T} (A \cup B_t) = A \cup \bigcup_{t \in T} B_t$

$$\text{Zadanie 215. } \bigcap_{t \in T} (A \cup B_t) = A \cup \bigcap_{t \in T} B_t$$

$$\text{Zadanie 216. } \bigcup_{t \in T} (A \cap B_t) = A \cap \bigcup_{t \in T} B_t$$

$$\text{Zadanie 217. } \bigcap_{t \in T} (A \cap B_t) = A \cap \bigcap_{t \in T} B_t$$

W poniższych zadaniach udowodnij, że dla dowolnej rodziny zbiorów $\{A_{t,s}\}_{t \in T, s \in S}$, gdzie T i S są niepustymi zbiorami indeksów, zachodzą podane relacje. Czy zachodzą inkluzje odwrotne?

$$\text{Zadanie 218. } \bigcup_{t \in T} \bigcup_{s \in S} A_{t,s} = \bigcup_{s \in S} \bigcup_{t \in T} A_{t,s}$$

$$\text{Zadanie 219. } \bigcap_{t \in T} \bigcap_{s \in S} A_{t,s} = \bigcap_{s \in S} \bigcap_{t \in T} A_{t,s}$$

$$\text{Zadanie 220. } \bigcup_{t \in T} \bigcap_{s \in S} A_{t,s} \subseteq \bigcap_{s \in S} \bigcup_{t \in T} A_{t,s}$$

W poniższych zadaniach udowodnij, że dla dowolnej rodziny zbiorów $\{A_{t,s}\}_{t,s \in T}$, gdzie T jest niepustym zbiorem indeksów, zachodzą podane relacje. Czy zachodzą inkluzje odwrotne?

$$\text{Zadanie 221. } \bigcup_{t \in T} A_{t,t} \subseteq \bigcup_{t \in T} \bigcup_{s \in T} A_{t,s}$$

$$\text{Zadanie 222. } \bigcap_{t \in T} \bigcap_{s \in T} A_{t,s} \subseteq \bigcap_{t \in T} A_{t,t}$$

W poniższych zadaniach udowodnij, że dla dowolnych rodzin zbiorów $\{A_t\}_{t \in T}$, $\{B_s\}_{s \in S}$, gdzie T i S są niepustymi zbiorami indeksów, zachodzą podane równości.

$$\text{Zadanie 223. } \bigcup_{t \in T} A_t \cup \bigcup_{s \in S} B_s = \bigcup_{t \in T} \bigcup_{s \in S} (A_t \cup B_s)$$

$$\text{Zadanie 224. } \bigcup_{t \in T} A_t \cap \bigcup_{s \in S} B_s = \bigcup_{t \in T} \bigcup_{s \in S} (A_t \cap B_s)$$

$$\text{Zadanie 225. } \bigcap_{t \in T} A_t \cup \bigcap_{s \in S} B_s = \bigcap_{t \in T} \bigcap_{s \in S} (A_t \cup B_s)$$

$$\text{Zadanie 226. } \bigcap_{t \in T} A_t \cap \bigcap_{s \in S} B_s = \bigcap_{t \in T} \bigcap_{s \in S} (A_t \cap B_s)$$

W poniższych zadaniach udowodnij, że dla dowolnej rodziny zbiorów $\{A_n\}_{n=0}^{\infty}$ zachodzą podane relacje. W których przypadkach zachodzi inkluzja odwrotna?

Zadanie 227. $\bigcap_{n=0}^{\infty} A_n \subseteq \bigcup_{n=0}^{\infty} \bigcap_{k=n}^{\infty} A_k$

Zadanie 228. $\bigcup_{n=0}^{\infty} \bigcap_{k=n}^{\infty} A_k \subseteq \bigcap_{n=0}^{\infty} \bigcup_{k=n}^{\infty} A_k$

Zadanie 229. $\bigcap_{n=0}^{\infty} \bigcup_{k=n}^{\infty} A_k \subseteq \bigcup_{n=0}^{\infty} A_n$

Zadanie 230. $\bigcup_{n=0}^{\infty} A_{n+1} \subseteq \bigcup_{n=0}^{\infty} (A_{n+1} \setminus \bigcup_{m=1}^n A_m)$

Zadanie 231. $\bigcup_{n=0}^m A_n = \left(\bigcup_{n=0}^{m-1} (A_n \setminus A_{n+1}) \right) \cup (A_m \setminus A_0) \cup \bigcap_{n=0}^m A_n$

Zadanie 232. $\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n = \left(\left(\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n \right) \setminus A_0 \right) \cup \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} (A_n \setminus A_{n+1}) \right) \cup \bigcap_{n=0}^{\infty} A_n$

Definicja 73. Rodzina zbiorów $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ jest *zstępująca*, jeżeli $A_{n+1} \subseteq A_n$ dla każdego $n \in \mathbb{N}$ i *wstępująca*, jeżeli $A_n \subseteq A_{n+1}$ dla każdego $n \in \mathbb{N}$.

Zadanie 233. Udowodnij, że jeśli $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ i $\{B_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ są zstępującymi rodzinami zbiorów, to

$$\bigcap_{i \in \mathbb{N}} (A_i \cup B_i) = \left(\bigcap_{i \in \mathbb{N}} A_i \right) \cup \left(\bigcap_{i \in \mathbb{N}} B_i \right).$$

Wskaż przykład rodzin $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ i $\{B_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ dla których równość powyższa nie zachodzi. Czy równość powyższa zachodzi dla rodzin wstępujących?

Zadanie 234. Udowodnij, że jeśli $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ i $\{B_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ są wstępującymi rodzinami zbiorów, to

$$\bigcup_{i \in \mathbb{N}} (A_i \cap B_i) = \left(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i \right) \cap \left(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} B_i \right).$$

Wskaż przykład rodzin $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ i $\{B_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ dla których równość powyższa nie zachodzi. Czy równość powyższa zachodzi dla rodzin zstępujących?

Zadanie 235. Udowodnij, że jeśli $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ jest zstępującą rodziną zbiorów, to

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (A_{2n+1} \setminus A_{2n+2}) \cup \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n = A_0 \setminus \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (A_{2n} \setminus A_{2n+1}).$$

Zadanie 236. Udowodnij, że jeśli $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ jest zstępującą rodziną zbiorów, to

$$\bigcup_{n=0}^{\infty} \bigcap_{i=0}^n A_i = \bigcap_{n=0}^{\infty} \bigcup_{i=0}^n A_i.$$

Zadanie 237. Udowodnij, że jeśli $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ jest wstępującą rodziną zbiorów, to

$$\bigcup_{n=0}^{\infty} \bigcap_{i=0}^n A_i = \bigcap_{n=0}^{\infty} \bigcup_{i=0}^n A_i.$$

Zadanie 238. Udowodnij, że jeśli $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ jest zstępującą rodziną zbiorów, to

$$\bigcup_{n=0}^{\infty} \bigcap_{i=n}^{\infty} A_i = \bigcap_{n=0}^{\infty} \bigcup_{i=n}^{\infty} A_i = \bigcap_{n=0}^{\infty} A_n.$$

Zadanie 239. Udowodnij, że jeśli $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ jest wstępującą rodziną zbiorów, to

$$\bigcup_{n=0}^{\infty} \bigcap_{i=n}^{\infty} A_i = \bigcap_{n=0}^{\infty} \bigcup_{i=n}^{\infty} A_i = \bigcup_{n=0}^{\infty} A_n.$$

Zadanie 240. Niech $\{A_{n,m}\}_{n,m=0}^{\infty}$ będzie rodziną zbiorów indeksowaną parami liczb naturalnych. Pokaż, że jeśli

$$A_{n,m} \subseteq A_{n+1,m} \cap A_{n,m+1}$$

dla wszelkich n i m , to

$$\bigcup_{n=0}^{\infty} \bigcup_{m=0}^{\infty} A_{n,m} = \bigcup_{n=0}^{\infty} A_{n,n}.$$

Zadanie 241. Dane są rodziny zbiorów $\{A_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ i $\{B_i\}_{i \in \mathbb{N}}$. Wiadomo, że dla każdego i istnieje k takie, że $A_i \subseteq \bigcup_{j=0}^k B_j$. Udowodnij, że:

$$1. \text{ dla każdego } i \text{ istnieje takie } k, \text{ że } \bigcup_{j=0}^i A_j \subseteq \bigcup_{j=0}^k B_j,$$

$$2. \bigcup_{i=0}^{\infty} A_i \subseteq \bigcup_{i=0}^{\infty} B_i.$$

Zadanie 242. Rozważmy dowolną rodzinę zbiorów \mathcal{A} .

1. Udowodnij, że $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{P}(\bigcup \mathcal{A})$.
2. Udowodnij, że $\mathcal{P}(\bigcup \mathcal{A}) \subseteq \mathcal{A}$ wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje taki zbiór B , że $\mathcal{A} = \mathcal{P}(B)$.

Zadanie 243. Zbiór W na płaszczyźnie jest *wypukły*, jeśli wraz z każdymi dwoma punktami zawiera cały łączący je odcinek, tj. gdy $\overline{ab} \subseteq W$ dla dowolnych punktów $a, b \in W$. Niech $\{W_i : i \in \mathbb{N}\}$ będzie wstępującą rodziną zbiorów wypukłych. Pokaż, że zbiór $W = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} W_i$ jest wypukły.

5

Relacje

5.1. Para uporządkowana i iloczyn (produkt) kartezjański

Parę uporządkowaną (w skrócie *parę*) elementów a i b będziemy zapisywać w postaci $\langle a, b \rangle$. Para będzie dla nas pojęciem pierwotnym. Przyjmujemy, że spełnia ona następujący aksjomat.

Aksjomat 74. $\langle a, b \rangle = \langle c, d \rangle$ wtedy i tylko wtedy, gdy $a = c$ oraz $b = d$.

Aby określić parę uporządkowaną wystarczy podać dwuelementowy zbiór jej elementów i wskazać, który z nich jest pierwszy. Specjaliści od podstaw matematyki pragną za pojęcia pierwotne uważać jedynie zbiór i relację należenia do zbioru i dlatego wolą *zdefiniować* parę następująco:

$$\langle a, b \rangle = \{\{a\}, \{a, b\}\}.$$

Zadanie 244. Udowodnij, że zdefiniowana wyżej para $\langle a, b \rangle$ spełnia aksjomat 74.

Definicja 75. *Iloczynem kartezjańskim* dwóch zbiorów nazywamy zbiór wszystkich par uporządkowanych złożonych z elementów tych zbiorów:

$$A \times B = \{\langle a, b \rangle \mid a \in A \wedge b \in B\}.$$

Czasem zamiast $A \times A$ będziemy pisać A^2 .

Przykład 76. Pokażemy, że dla dowolnych zbiorów A i B zachodzi równoważność: $A \times B = \emptyset$ wtedy i tylko wtedy, gdy $A = \emptyset$ lub $B = \emptyset$.

Dowód. Weźmy dowolne zbiory A i B . Wystarczy pokazać dwie implikacje: (\Rightarrow) jeśli $A \times B = \emptyset$ to $A = \emptyset$ lub $B \neq \emptyset$, oraz (\Leftarrow) jeśli $A = \emptyset$ lub $B = \emptyset$ to $A \times B = \emptyset$.

Dowód (\Rightarrow) : Przez kontrapozycję wystarczy pokazać, że jeśli $A \neq \emptyset$ i $B \neq \emptyset$ to $A \times B \neq \emptyset$. Załóżmy więc, że $A \neq \emptyset$ i $B \neq \emptyset$. Wtedy istnieją elementy $a \in A$ oraz $b \in B$, a stąd $\langle a, b \rangle \in A \times B$. Zatem $A \times B \neq \emptyset$.

Dowód (\Leftarrow): Załóżmy, że $A = \emptyset$ lub $B = \emptyset$. Weźmy dowolne x . Gdyby $x \in A \times B$, to istniałyby takie elementy $a \in A$ oraz $b \in B$, że $x = \langle a, b \rangle$. Wtedy $A \neq \emptyset$ i $B \neq \emptyset$, co przeczy założeniu, że $A = \emptyset$ lub $B = \emptyset$. Zatem $x \notin A \times B$. Ponieważ żaden element nie należy do $A \times B$, z definicji zbioru pustego otrzymujemy $A \times B = \emptyset$. ■

Zadanie 245. Uzupełnij i udowodnij podane wzory.

$$\begin{aligned}(A \cap B) \times C &= (A \times C) \cap (B \times C) \\ A \times (B \setminus C) &= (A \times B) \setminus (A \times C) \\ (A \cup B) \times C &= ? \\ (A \cup B) \times (C \cup D) &= ?\end{aligned}$$

Zadanie 246. Udowodnij, że dla dowolnych zbiorów A i B równość $A \times B = B \times A$ zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy

$$A = \emptyset \text{ lub } B = \emptyset \text{ lub } A = B.$$

Zadanie 247. Udowodnij, że jeżeli $A \times B = C \times D$, to

$$(A = C \text{ i } B = D) \text{ lub } ((A = \emptyset \text{ lub } B = \emptyset) \text{ i } (C = \emptyset \text{ lub } D = \emptyset)).$$

Zadanie 248. Załóżmy, że $B \subseteq Y$. Czy dla dowolnych zbiorów A i X zachodzi równość

$$(X \times Y) \setminus (A \times B) = (X \times (Y \setminus B)) \cup ((X \setminus A) \times B)?$$

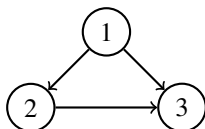
5.2. Relacje

Definicja 77. Dowolny podzbiór $R \subseteq A \times B$ produktu kartezjańskiego zbiorów A i B nazywamy *relacją dwuargumentową (binarną)*. Jeśli $\langle a, b \rangle \in R$, to mówimy, że elementy $a \in A$ i $b \in B$ są ze sobą w relacji R . Zamiast pisać $\langle a, b \rangle \in R$, piszemy też niekiedy aRb lub $R(a, b)$. Podzbiory $A \times A$ są *binarnymi relacjami na zbiorze A* .

Przykład 78. Relacjami binarnymi są:

- identyczność (równość, przekątna) na zbiorze \mathbb{N} : $\{\langle x, x \rangle \in \mathbb{N}^2 \mid x \in \mathbb{N}\}$,
- identyczność I_A na dowolnym zbiorze A : $\{\langle x, x \rangle \in A^2 \mid x \in A\}$
- relacja mniejszości \leq na zbiorze \mathbb{N} : $\{\langle x, y \rangle \in \mathbb{N}^2 \mid x \leq y\}$,
- taka $R \subseteq \mathbb{Z} \times \mathbb{N}$, że xRy gdy $y = x^2$.

Przykład 79. W teorii grafów relację binarną na zbiorze A nazywa się *grafem skierowanym* o wierzchołkach w zbiorze A . Przykładowo, relację mniejszości na zbiorze $\{1, 2, 3\}$, czyli zbiór par $\{\langle x, y \rangle \in \{1, 2, 3\}^2 \mid x < y\}$, czyli zbiór $\{\langle 1, 2 \rangle, \langle 1, 3 \rangle, \langle 2, 3 \rangle\}$ można przedstawić graficznie w następujący sposób:



Grafy (a zatem i relacje binarne) często są reprezentowane za pomocą tzw. *macierzy sąsiedztwa*, czyli tablic dwuwymiarowych indeksowanych zbiorem wierzchołków, o wartościach w zbiorze $\{0, 1\}$. Wartość 1 w polu $\langle x, y \rangle$ oznacza, że para $\langle x, y \rangle$ należy do relacji; wartość 0 oznacza, że nie należy. Relacja mniejszości na zbiorze $\{1, 2, 3\}$ ma następującą macierz sąsiedztwa:

$x \setminus y$	1	2	3
1	0	1	1
2	0	0	1
3	0	0	0

Zadanie 249. Podaj intuicyjny sens poniższych relacji dwuargumentowych na zbiorze $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$:

a)

$x \setminus y$	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	1	0	0
2	1	0	0	1	0	0
3	1	0	0	1	0	0
4	1	0	0	1	0	0
5	1	0	0	1	0	0
6	1	0	0	1	0	0

b)

$x \setminus y$	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	0	0	1
2	0	1	0	0	1	0
3	1	0	0	1	0	0
4	0	0	1	0	0	1
5	0	1	0	0	1	0
6	1	0	0	1	0	0

c)

$x \setminus y$	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	0

Definicja 80. Relacja $R \subseteq A \times A$ jest

- *zwrotna*, jeśli dla wszystkich $a \in A$ zachodzi aRa ,
- *symetryczna*, jeśli dla wszystkich $a, b \in A$ zachodzi implikacja $aRb \Rightarrow bRa$,
- *przechodnia*, jeśli dla wszystkich $a, b, c \in A$ zachodzi $aRb \wedge bRc \Rightarrow aRc$.
- *antyzwrotna*, jeśli dla wszystkich $a \in A$ zachodzi $\neg(aRa)$,
- *antysymetryczna*, jeśli dla wszystkich $a, b \in A$ zachodzi implikacja $aRb \Rightarrow \neg(bRa)$,
- *słabo antisymetryczna*, jeśli dla wszystkich $a, b \in A$ zachodzi implikacja $aRb \wedge bRa \Rightarrow a = b$,

Relację zwrotną, symetryczną i przechodnią nazywamy *relacją równoważności*. Relację zwrotną, przechodnią i słabo antisymetryczną nazywamy *relacją częściowego porządku*.

Zadanie 250. Niech dla relacji R

- $Z(R)$ oznacza, że R jest zwrotna,
- $S(R)$ oznacza, że R jest symetryczna,
- $P(R)$ oznacza, że R jest przechodnia,
- $A(R)$ oznacza, że R jest słabo antisymetryczna.

W każdym z poniższych punktów podaj przykłady takich relacji R_1, R_2, R_3 i R_4 , żeby podana formuła była spełniona.

1. $Z(R_1) \wedge S(R_1) \wedge P(R_1)$
2. $Z(R_2) \wedge P(R_2) \wedge \neg S(R_2)$
3. $Z(R_3) \wedge S(R_3) \wedge P(R_3) \wedge A(R_3)$
4. $\neg Z(R_4) \wedge \neg A(R_4) \wedge P(R_4)$

Zadanie 251. Na zbiorze $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ wszystkich podzbiorów zbioru liczb naturalnych wprowadzamy relację binarną R wzorem

$$R(X, Y) \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \exists m \forall n > m (n \in X \Leftrightarrow n \in Y).$$

Udowodnij, że R jest relacją równoważności.

5.3. Krotki (n -tki) uporządkowane i relacje n -argumentowe

Pojęcie pary łatwo uogólnić na ciągi uporządkowane dowolnej, skończonej długości, które będziemy nazywać *krotkami* (n -tkami). Zakładamy, że $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$ jest pojęciem pierwotnym i przyjmujemy:

Aksjomat 81. $\langle a_1, \dots, a_n \rangle = \langle b_1, \dots, b_n \rangle \Leftrightarrow a_1 = b_1 \wedge \dots \wedge a_n = b_n$.

Krotki można również *zdefiniować* za pomocą pojęcia pary: krotka dwuelementowa jest parą, krotka $n + 1$ -elementowa jest parą złożoną z pierwszego elementu i krotki n -elementowej:

$$\langle a_0, a_1, \dots, a_n \rangle = \langle a_0, \langle a_1, \dots, a_n \rangle \rangle$$

Definicja 82. W oczywisty sposób uogólniamy pojęcie *produktu* na n zbiorów:

$$A_1 \times \dots \times A_n = \{ \langle a_1, \dots, a_n \rangle \mid a_1 \in A_1, \dots, a_n \in A_n \}.$$

Dla $n \geq 2$ zamiast

$$\underbrace{A \times \dots \times A}_{n \text{ razy}}$$

piszemy w skrócie A^n . Przyjmujemy dodatkowo, że $A^1 = A$.

Definicja 83. *Relacją n -argumentową* nazywamy dowolny podzbiór produktu n zbiorów.

Dla przykładu

$$\{ \langle a, b, c \rangle \in \mathbb{N}^3 \mid a \cdot b = c \} \quad \text{oraz} \quad \{ \langle a, b, c \rangle \in \mathbb{N}^3 \mid a \cdot b < c \}$$

są relacjami trójargumentowymi na zbiorze \mathbb{N} .

Zadanie 252. Ile jest relacji n -argumentowych na zbiorze 5-elementowym?

5.4. Złożenie relacji. Relacja odwrotna

Definicja 84. Dane są relacje $P \subseteq A \times B$ i $Q \subseteq B \times C$. Relacja

$$P; Q = \{ \langle a, c \rangle \mid \exists b (a P b \wedge b Q c) \} \subseteq A \times C$$

nazywa się *złożeniem* relacji P i Q . Relacja

$$P^{-1} = \{ \langle b, a \rangle \mid \langle a, b \rangle \in P \} \subseteq B \times A$$

nazywa się *relacją odwrotną* do P .

W definicji złożenia relacji użyliśmy bardzo rzadko używanej w literaturze matematycznej notacji $P; Q$. Najczęściej używa się oznaczenia $Q \circ P$ lub $Q \cdot P$ (zwróćmy uwagę na odwróconą kolejność argumentów P i Q), przy czym sam operator składania (\circ lub \cdot) jest zwykle pomijany i pisze się po prostu QP . Notacja $P; Q$ jest naturalna w informatyce, gdzie symbol $;$ oznacza sekwencyjne złożenie instrukcji.

Zadanie 253. Niech A będzie ustalonym niepustym zbiorem. Czy prawdą jest, że dla dowolnej relacji $R \subseteq A^2$ zachodzi

$$\phi(R) \Rightarrow \phi(R; R),$$

gdzie $R; R$ oznacza złożenie relacji R ze sobą, a $\phi(R)$ oznacza, że relacja R jest

1. zwrotna na zbiorze A ,
2. symetryczna na zbiorze A ,
3. przechodnia na zbiorze A ,
4. antysymetryczna na zbiorze A .

Zadanie 254. Niech R będzie relacją binarną. Które z poniższych stwierdzeń są prawdziwe:

1. $R; R \subseteq R$,
2. $R; R = R$,
3. $R; R \supseteq R$,

jeżeli relacja R jest

1. zwrotna?
2. symetryczna?
3. przechodnia?

Twierdzenie 85. Dla dowolnych relacji $R \subseteq A \times B$, $S \subseteq B \times C$ i $T \subseteq C \times D$:

$$\begin{aligned} (R; S); T &= R; (S; T) \\ (R; S)^{-1} &= S^{-1}; R^{-1} \end{aligned}$$

Zadanie 255. Rozważmy relacje $R \subseteq A \times B$, $S \subseteq A \times B$ i $T \subseteq B \times C$. Uzupełnij i udowodnij wzory:

$$\begin{aligned} R; I_B &= R \\ I_A; R &= R \\ (R \cup S)^{-1} &= R^{-1} \cup S^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(R \cap S)^{-1} &= R^{-1} \cap S^{-1} \\
(R^{-1})^{-1} &= R \\
(R \cup S); T &= R; T \cup S; T \\
(R \cap S); T &\subseteq R; T \cap S; T \\
((R \cup S); T)^{-1} &= T^{-1}; R^{-1} \cup T^{-1}; S^{-1} \\
(A \times B)^{-1} &= B \times A \\
(A \times B); (C \times D) &= ?
\end{aligned}$$

Zadanie 256. Niech R i S będą symetrycznymi relacjami na zbiorze A . Udowodnij, że jeśli $S; R = R; S$ to relacja $R; S$ jest symetryczna.

Zadanie 257. Niech R i S będą symetrycznymi relacjami na zbiorze A . Udowodnij, że jeśli relacja $R; S$ jest symetryczna, to $S; R = R; S$.

Zadanie 258. Niech R i S będą relacjami równoważności na zbiorze A . Udowodnij, że jeśli relacja $R; S$ jest przechodnia to jest też symetryczna.

Definicja 86. Dla relacji $R \subseteq A^2$ definiujemy $R^0 = I_A$ oraz $R^{n+1} = R^n; R$ dla $n \geq 0$.

Przykład 87. Pokażemy indukcyjnie, że dla każdej liczby naturalnej $n \geq 0$ zachodzi równość $R^n; R = R; R^n$.

Podstawa indukcji: Dla $n = 0$ mamy $R^0; R = I_A; R = R = R; I_A = R; R^0$.

Krok indukcyjny: Weźmy dowolne $n \geq 0$ i załóżmy, że $R^n; R = R; R^n$. Pokażemy, że $R^{n+1}; R = R; R^{n+1}$. Z definicji R^{n+1} mamy $R^{n+1}; R = (R^n; R); R$. Z założenia indukcyjnego $(R^n; R); R = (R; R^n); R$. Z łączności składania relacji wiemy, że $(R; R^n); R = R; (R^n; R)$ i ponownie z definicji R^{n+1} otrzymujemy $R; (R^n; R) = R; R^{n+1}$. Zatem $R^{n+1}; R = R; R^{n+1}$, co kończy dowód.

Zadanie 259. Oblicz $R^2 = R; R$, R^3 i R^4 dla relacji z zadania 249.

Zadanie 260. Wykaż, że jeśli R jest relacją zwrotną i przechodnią, to $R^n = R$ dla każdego $n \geq 1$.

Zadanie 261. Niech $R \subseteq A^2$ będzie dowolną relacją. Udowodnij, że dla dowolnych dodatnich liczb naturalnych i, j zachodzi równość $R^{i+j} = R^i; R^j$.

Zadanie 262. Niech $R \subseteq A^2$ będzie dowolną relacją. Wykaż, że $R \cup R^0 \cup R^{-1}$ jest relacją zwrotną i symetryczną.

Zadanie 263. Niech $R \subseteq A^2$ będzie pewną relacją binarną na zbiorze A oraz

$$\begin{aligned}\mathcal{T} &= \{S \subseteq A^2 \mid S \text{ jest przechodnia} \wedge R \subseteq S\}, \\ R^+ &= \bigcap \mathcal{T}.\end{aligned}$$

Pokaż, że

1. $R \subseteq R^+$,
2. jeśli S jest taką relacją przechodnią, że $R \subseteq S$, to $R^+ \subseteq S$,
3. R^+ jest relacją przechodnią.

Relacja R^+ jest zatem najmniejszą (w sensie zawierania zbiorów) relacją przechodnią zawierającą relację R .

Definicja 88. Relację R^+ nazywamy *przechodnim (tranzytywnym) domknięciem* R .

Zadanie 264. Niech $R \subseteq A^2$ będzie dowolną relacją i niech $\bar{R} = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$. Wykaż, że \bar{R} jest relacją przechodnią.

Zadanie 265. Wykaż, że relacja \bar{R} z poprzedniego zadania jest przechodnim domknięciem relacji R .

5.5. Relacyjny rachunek dziedzin

Relacyjny rachunek dziedzin to jeden z języków zapytań używanych w teorii relacyjnych baz danych. Zapytania w tym języku są wyrażeniami postaci

$$\{\langle x_1, \dots, x_n \rangle \mid \phi\}$$

gdzie ϕ jest formułą logiki I rzędu ze zmiennymi wolnymi x_1, \dots, x_n .

W zadaniach poniżej rozważmy skończone zbiory osób O , barów B i soków S oraz relacje $Bywa \subseteq O \times B$, $Lubi \subseteq O \times S$ i $Podają \subseteq B \times S$ informujące odpowiednio o tym jakie osoby bywają w jakich barach, jakie osoby lubią jakie soki oraz jakie bary podają jakie soki. Wtedy np. zapytanie

$$\{x \mid Lubi(x, \text{malinowy}) \wedge \exists b. Podają(b, \text{malinowy}) \wedge Bywa(x, b)\}$$

oznacza wykaz osób, które lubią sok malinowy i bywają w jakimś barze, w którym jest on podawany.

Zadanie 266. Wyraź w relacyjnym rachunku dziedzin następujące zapytania:

- wykaz osób, które lubią wszystkie soki podawane we wszystkich barach, w których bywają;

- wykaz osób, które bywają tylko w takich barach, w których podawane są wszystkie soki lubiane przez te osoby;
- wykaz osób, które bywają tylko w takich barach, w których mogą się czegoś napić.¹

Zadanie 267. Wyraż w relacyjnym rachunku dziedzin następujące zapytania:

- wykaz soków podawanych w barze *Jagódka*, których nie lubi żadna osoba bywająca w tym barze.
- wykaz soków lubianych tylko przez osoby bywające w barze *Jagódka*.
- wykaz soków lubianych przez wszystkie osoby bywające w barze *Jagódka*.
- wykaz soków lubianych przez osoby bywające we wszystkich barach, w których podaje się jakiegokolwiek sok.

¹bardziej formalnie, przez *osoba o może się czegoś napić w barze b* rozumiemy, że w barze *b* jest podawany jakiś sok lubiany przez osobę *o*.

6

Funkcje

Definicja 89. Relację $f \subseteq A \times B$ nazywamy *funkcją o dziedzinie A i zbiorze wartości (przeciwdziedzinie) B* , jeżeli spełnia ona dwa warunki

1. dla każdego $a \in A$ istnieje taki $b \in B$, że $\langle a, b \rangle \in f$,
2. dla dowolnych $a \in A$ oraz $b_1, b_2 \in B$, jeśli $\langle a, b_1 \rangle \in f$ oraz $\langle a, b_2 \rangle \in f$, to $b_1 = b_2$.

Zbiór wszystkich funkcji o dziedzinie A i przeciwdziedzinie B oznaczamy B^A .

Relację spełniającą jedynie warunek 2 nazywamy *funkcją częściową*. Dziedziną funkcji częściowej f nazywamy zbiór

$$\text{Dom}(f) = \{a \in A \mid \exists b \in B \langle a, b \rangle \in f\}.$$

Zamiast $f \in B^A$ piszemy zwykle $f : A \rightarrow B$. Napis $f(a)$ oznacza taki element b , że $\langle a, b \rangle \in f$ (jeśli relacja f jest funkcją, to dla każdego a taki element b istnieje i jest dokładnie jeden, oznaczenie $f(a)$ jest więc jednoznaczne).

Pytanie 90. Ile jest funkcji $f : A \rightarrow B$? Ile jest funkcji $f : \emptyset \rightarrow B$, a ile $f : A \rightarrow \emptyset$?

Z pomocą pojęcia funkcji możemy jeszcze inaczej zdefiniować n -tki uporządkowane: $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$ jest funkcją $f : \{1, \dots, n\} \rightarrow A$. Wówczas $f(i)$ jest i -tym elementem krotki.

Definicja 91. Funkcja $f : A \rightarrow B$ jest *różnowartościowa* (jest *injekcją*), jeżeli

$$\text{dla dowolnych } a_1, a_2 \in A, \text{ jeśli } a_1 \neq a_2, \text{ to } f(a_1) \neq f(a_2).$$

Funkcja $f : A \rightarrow B$ jest „na” (jest *surjekcją*), jeżeli

$$\text{dla dowolnego } b \in B \text{ istnieje taki } a \in A, \text{ że } f(a) = b.$$

Funkcja f jest *odwzorowaniem wzajemnie jednoznaczny* (*bijekcją*), jeśli jest różnowartościowa i „na”.

Zadanie 268. Które spośród relacji z zadania 249 są funkcjami?

W poniższych zadaniach skonstruuj bijekcje f , g oraz h o podanych dziedzinach i przeciwdziedzinach. Nie zapomnij uzasadnić, że skonstruowane funkcje są bijekcjami.

Zadanie 269.

1. $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$
2. $g : ((0, 1) \times (2, 3)) \rightarrow (0, 2) \times (5, 6)$
3. $h : (\mathbb{Z} \times [0, 1)) \rightarrow \mathbb{R}$

Zadanie 270.

1. $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \times \{0, 1\}$
2. $g : [0, 1) \rightarrow [0, \infty)$
3. $h : \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \rightarrow \{3, 4\}^{\mathbb{P}}$

Tutaj \mathbb{P} oznacza zbiór liczb parzystych, czyli $\mathbb{P} = \{n \in \mathbb{N} \mid \exists k \in \mathbb{N} \ n = 2k\}$.

6.1. Funkcje odwrotne i złożenie funkcji

Na początku tego rozdziału powiedzieliśmy, że funkcje są relacjami — dlatego można je tak jak relacje składać. Funkcje jednak wygodniej składa się w odwrotnej kolejności niż relacje, ponadto składanie funkcji jest (zarówno w matematyce jak i w informatyce) operacją bardzo często wykonywaną i w związku z tym operator składania jest zwykle pomijany (podobnie jak np. operator mnożenia w wyrażeniu $2x$). Jeśli zatem f i g są funkcjami, to gf będzie oznaczać złożenie $g \circ f$ relacji f i g , czyli relację $f;g$.

Twierdzenie 92. Niech dane będą funkcje $f : A \rightarrow B$ i $g : B \rightarrow C$. Wówczas relacja $gf \subseteq A \times C$ jest funkcją z A w C oraz $(gf)(a) = g(f(a))$ dla każdego $a \in A$. Jeżeli ponadto obie funkcje f i g są różnowartościowe, to gf też jest różnowartościowa. Jeżeli obie funkcje f i g są „na”, to gf też jest „na”.

Definicja 93. Niech $f : A \rightarrow B$ będzie funkcją. Wtedy funkcja $g : B \rightarrow A$ jest *funkcją odwrotną* do f , jeśli $gf = I_A$ oraz $fg = I_B$ (gdzie I_A, I_B oznaczają funkcje identycznościowe odpowiednio na zbiorach A i B).

Twierdzenie 94. Niech $f : A \rightarrow B$ będzie funkcją. Wtedy następujące warunki są równoważne:

1. f ma funkcję odwrotną,

2. f jest bijekcją,
3. relacja odwrotna f^{-1} jest funkcją określoną na zbiorze B .

Funkcję odwrotną do f oznaczamy f^{-1} . Zauważmy, że mamy tutaj kolizję oznaczeń: napis f^{-1} oznacza zarówno funkcję odwrotną do f (która nie zawsze istnieje) jak i relację odwrotną do f (która istnieje zawsze).

Zadanie 271. Niech $f : A \rightarrow B$ i $g : B \rightarrow C$. Które z poniższych implikacji są prawdziwe?

1. Jeżeli gf jest „na”, to f jest „na”.
2. Jeżeli gf jest „na”, to g jest „na”.
3. Jeżeli gf jest różnowartościowa, to f jest różnowartościowa.
4. Jeżeli gf jest różnowartościowa, to g jest różnowartościowa.

Przykład 95. Pokażemy, że $R \subseteq A \times B$ jest funkcją częściową wtedy i tylko wtedy gdy $R^{-1}; R \subseteq I_B$.

Dowód. Najpierw pokażemy implikację \Rightarrow . Załóżmy, że $R \subseteq A \times B$ jest funkcją częściową i pokażemy, że $R^{-1}; R \subseteq I_B$. Weźmy więc dowolny element e zbioru $R^{-1}; R$. Ponieważ $R^{-1}; R$ jest relacją zawartą w $B \times B$, dla pewnych $b_1, b_2 \in B$ mamy $e = \langle b_1, b_2 \rangle$. Z definicji złożenia relacji wiemy, że istnieje takie $a \in A$, że $\langle b_1, a \rangle \in R^{-1}$ oraz $\langle a, b_2 \rangle \in R$. Z definicji relacji odwrotnej otrzymujemy $\langle a, b_1 \rangle \in R$ oraz $\langle a, b_2 \rangle \in R$. Ponieważ R jest funkcją częściową, $b_1 = b_2$, a zatem $e = \langle b_1, b_1 \rangle$ i $e \in I_B$.

Teraz pokażemy implikację \Leftarrow . Załóżmy, że $R^{-1}; R \subseteq I_B$ i pokażemy, że R jest funkcją częściową. Weźmy więc dowolne $a \in A$ oraz $b_1, b_2 \in B$ i załóżmy, że $\langle a, b_1 \rangle \in R$ oraz $\langle a, b_2 \rangle \in R$. Z definicji relacji odwrotnej mamy $\langle b_1, a \rangle \in R^{-1}$ i dalej z definicji złożenia relacji otrzymujemy $\langle b_1, b_2 \rangle \in R^{-1}; R$. Z założenia $R^{-1}; R \subseteq I_B$ otrzymujemy $b_1 = b_2$, co kończy dowód faktu, że R jest funkcją częściową. ■

6.2. Obraz i przeciwobraz zbioru

Definicja 96. Niech $f : A \rightarrow B$ będzie funkcją i niech $X \subseteq A$. *Obrazem zbioru X w odwzorowaniu f nazywamy zbiór*

$$f[X] = \{b \in B \mid \exists a \in X f(a) = b\}.$$

Przeciwobrazem zbioru $Y \subseteq B$ w odwzorowaniu f nazywamy zbiór

$$f^{-1}[Y] = \{a \in A \mid f(a) \in Y\}.$$

W literaturze często można spotkać inne oznaczenia obrazu i przeciwobrazu zbioru, np. $f(X)$, $f^{-1}(Y)$ i $\vec{f}(X)$, $\vec{f}^{-1}(Y)$. Zwróć uwagę na kolejną kolizję oznaczeń: w zależności od kontekstu f^{-1} może teraz oznaczać funkcję odwrotną, relację odwrotną lub przeciwobraz zbioru.

Twierdzenie 97. Niech $f : A \rightarrow B$ będzie funkcją, \mathcal{X} rodziną podzbiorów zbioru A , zaś \mathcal{Y} rodziną podzbiorów zbioru B . Wtedy

$$f\left[\bigcup \mathcal{X}\right] = \bigcup \{f[X] \mid X \in \mathcal{X}\} \quad (1)$$

$$\text{Jeśli } \mathcal{X} \neq \emptyset, \text{ to } f\left[\bigcap \mathcal{X}\right] \subseteq \bigcap \{f[X] \mid X \in \mathcal{X}\} \quad (2)$$

$$f^{-1}\left[\bigcup \mathcal{Y}\right] = \bigcup \{f^{-1}[Y] \mid Y \in \mathcal{Y}\} \quad (3)$$

$$\text{Jeśli } \mathcal{Y} \neq \emptyset, \text{ to } f^{-1}\left[\bigcap \mathcal{Y}\right] = \bigcap \{f^{-1}[Y] \mid Y \in \mathcal{Y}\} \quad (4)$$

Pytanie 98. Czy symbol „ \subseteq ” we wzorze (2) można zastąpić symbolem „ $=$ ”? Czy założenia o niepustości rodzin \mathcal{X} i \mathcal{Y} we wzorach (2) i (4) są potrzebne?

Zadanie 272. Niech $f : X \rightarrow Y$ oraz $A, B \subseteq X$. Uzupełnij i udowodnij wzory:

$$\begin{aligned} f[A \cup B] &= f[A] \cup f[B] \\ f[A \cap B] &? f[A] \cap f[B] \\ f^{-1}[f[A]] &? A \end{aligned}$$

Zadanie 273. Niech $f : X \rightarrow Y$ oraz $C, D \subseteq Y$. Uzupełnij i udowodnij wzory:

$$\begin{aligned} f^{-1}[C \cap D] &= f^{-1}[C] \cap f^{-1}[D] \\ f^{-1}[C \cup D] &= ? \\ f[f^{-1}[C]] &? C \\ f[f^{-1}[C]] &= ? \end{aligned}$$

Zadanie 274. Niech $f : X \rightarrow Y$ będzie bijekcją, a $g : Y \rightarrow X$ funkcją odwrotną do f . Udowodnij, że $f^{-1}[C] = g[C]$ dla dowolnego $C \subseteq Y$.

Zadanie 275. Rozważmy funkcję $f : A \rightarrow B$ i zdefiniujmy funkcję $g : \mathcal{P}(B) \rightarrow \mathcal{P}(A)$ wzorem

$$g(Y) = f^{-1}[Y].$$

Udowodnij, że g jest różnowartościowa wtedy i tylko wtedy, gdy f jest „na”.

Zadanie 276. Udowodnij, że istnieje dokładnie jedna monotoniczna bijekcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$.

Zadanie 277. Udowodnij, że istnieje dokładnie jedna funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ spełniająca warunki

- $f(0) = 1$,
- $\forall i, j \in \mathbb{N} \quad f(i + j + 1) = f(i) + f(j)$.

Zadanie 278. Udowodnij, że istnieje dokładnie jedna funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ spełniająca warunki

- $f(1) = 1$,
- $\forall i, j \in \mathbb{N} \quad f(i + j) = f(i) + 2ij + f(j)$.

Zadanie 279. Udowodnij, że jeśli $f : A \rightarrow B$ i $g : B \rightarrow A$ są takimi funkcjami, że $gf = I_A$ to f jest różnowartościowa a g jest „na”.

Zadanie 280. Udowodnij, że $f : A \rightarrow B$ jest różnowartościowa wtedy i tylko wtedy, gdy $f^{-1}[f[X]] = X$ dla wszystkich zbiorów $X \subseteq A$.

Zadanie 281. Udowodnij, że $f : A \rightarrow B$ jest „na” wtedy i tylko wtedy, gdy $f[f^{-1}[Y]] = Y$ dla wszystkich zbiorów $Y \subseteq B$.

Zadanie 282. Rozważmy dowolną funkcję $f : A \rightarrow B$. Udowodnij, że f jest różnowartościowa wtedy i tylko wtedy, gdy dla wszystkich podzbiorów X, Y zbioru A zachodzi równość

$$f[X] \cap f[Y] = f[X \cap Y].$$

Zadanie 283. Rozważmy dowolną funkcję $f : A \rightarrow B$. Udowodnij, że f jest różnowartościowa wtedy i tylko wtedy, gdy dla wszystkich podzbiorów X, Y zbioru A zachodzi równość

$$f[X] \setminus f[Y] = f[X \setminus Y].$$

Zadanie 284. Podaj przykład takiej różnowartościowej funkcji $f : A \rightarrow B$ oraz zbioru $Y \subseteq B$, że $f[f^{-1}[Y]] \neq Y$. Podaj przykład takiej funkcji „na” $f : A \rightarrow B$ oraz zbioru $X \subseteq A$, że $f^{-1}[f[X]] \neq X$.

Zadanie 285. Czy dla wszystkich funkcji $f : A \rightarrow B$ oraz zbiorów $X \subseteq A$ i $Y \subseteq B$ zachodzi równość $f^{-1}[f[X] \setminus Y] = X \setminus f^{-1}[Y]$? Czy zachodzi inkluzja w którąś stronę? Czy odpowiedź zmienia się, jeśli założymy, że f jest różnowartościowa lub „na”?

Zadanie 286. Dla liczb naturalnych k niech k oznacza zbiór $\{n \in \mathbb{N} \mid n < k\}$. Rozważmy funkcje $F : \underline{2013}^{\underline{2013}} \times \mathbb{N} \rightarrow \underline{2013}^{\underline{2013}}$ i $G : \underline{2013}^{\underline{2013}} \times \mathbb{N} \rightarrow \underline{2013}^{\underline{2013}}$ zadane wzorami

$$\begin{aligned} F(f, 0) &= id_{\underline{2013}} \\ F(f, n+1) &= f \circ F(f, n) \\ G(f, 0) &= id_{\underline{2013}} \\ G(f, n+1) &= G(f, n) \circ f \end{aligned}$$

gdzie $id_{\underline{2013}} : \underline{2013} \rightarrow \underline{2013}$ jest funkcją identycznościową zbioru $\underline{2013}$. Udowodnij, że $F = G$.

W poniższych zadaniach uznamy wyrażenie za poprawne, jeśli dla każdej użytej w nim funkcji (i dla dowolnych zbiorów A , B i C) jej argument należy do dziedziny tej funkcji. Np. dla $f : (A \times B) \rightarrow C$ oraz $a \in A$ wyrażenie $f(a)$ nie jest poprawne, bo $a \notin (A \times B)$.

Zadanie 287. Rozważmy funkcje

$$\begin{aligned} f &: (A \times B)^C \rightarrow A^{B \times C}, \\ g &: B \times C \rightarrow A, \\ h &: C \rightarrow A \times B \end{aligned}$$

oraz elementy $a \in A$, $b \in B$ i $c \in C$. Które z wyrażeń poniżej są poprawne? Uzasadnij odpowiedź.

1. $g(f(h))$
2. $(f(g))(a)$
3. $f(h(c))$
4. $(f(h))(b, c)$

Zadanie 288. Rozważmy funkcje

$$\begin{aligned} f &: (A \times B)^C \rightarrow C^{A \times B}, \\ g &: A \times B \rightarrow C, \\ h &: C \rightarrow A \times B \end{aligned}$$

oraz elementy $a \in A$, $b \in B$ i $c \in C$. Które z wyrażeń poniżej są poprawne? Uzasadnij odpowiedź.

1. $(f(h))(a, b)$
2. $(f(c))(a, b)$
3. $(f(h))(h(c))$
4. $g(f(h))$

Relacje równoważności

Definicja 99. Klasą abstrakcji elementu $a \in A$ względem relacji równoważności $\sim \subseteq A \times A$ nazywamy zbiór

$$[a]_{\sim} = \{b \in A \mid a \sim b\}.$$

Rodzinę zbiorów $A/\sim = \{[a]_{\sim} \mid a \in A\}$ nazywamy zbiorem ilorazowym relacji \sim .

Definicja 100. Mówimy, że rodzina zbiorów $\{X_i\}_{i \in I}$ jest *podziałem* zbioru A , jeśli

1. zbiory X_i są niepuste:

$$X_i \neq \emptyset \text{ dla każdego } i \in I,$$

2. zbiory X_i pokrywają zbiór A :

$$\bigcup_{i \in I} X_i = A, \quad \text{oraz}$$

3. zbiory X_i są parami rozłączne:

$$X_i \cap X_j = \emptyset,$$

dla wszelkich takich $i, j \in I$, że $X_i \neq X_j$.

Lemat 101. Dla dowolnej relacji równoważności $\sim \subseteq A \times A$ i elementów $a, b \in A$

$$a \sim b \quad \text{wtedy i tylko wtedy, gdy} \quad [a]_{\sim} = [b]_{\sim}.$$

Twierdzenie 102 (Zasada abstrakcji).

1. Klasy abstrakcji dowolnej relacji równoważności na zbiorze A tworzą podział zbioru A .
2. Dla każdego podziału zbioru A istnieje dokładnie jedna relacja równoważności, której klasy abstrakcji tworzą ten podział.



Rysunek 11: Relacja równoważności w postaci grafu (po lewej) i podziału (po prawej stronie).

Zasada abstrakcji utożsamia relacje równoważności na zbiorze A z podziałami zbioru A , co daje nowe możliwości przedstawiania graficznego relacji. Na rysunku 11 przedstawiono relację $R = \{\langle a, a \rangle, \langle b, b \rangle, \langle c, c \rangle, \langle a, c \rangle, \langle c, a \rangle\}$ w postaci grafu oraz w postaci podziału zbioru $\{a, b, c\}$.

Przykład 103. Definiujemy relację $\sim \subseteq (\mathbb{N} \times \mathbb{N})^2$ wzorem

$$\langle a, b \rangle \sim \langle c, d \rangle \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} a + d = b + c.$$

Relacja \sim jest relacją równoważności na $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$; dowód polega na sprawdzeniu wprost z definicji, że \sim jest zwrotna, symetryczna i przechodnia.

W podstawach matematyki zbiór liczb całkowitych \mathbb{Z} definiuje się jako zbiór ilorazowy $(\mathbb{N} \times \mathbb{N})/\sim$. Klasę abstrakcji $[\langle a, b \rangle]_{\sim}$ utożsamia się z wynikiem odejmowania $a - b$. Intuicyjnie, zbiór liczb całkowitych jest to zbiór wszystkich możliwych wyników odejmowania liczb naturalnych od siebie, przy czym niektóre z tych odejmowań (jak np. $1 - 3$ i $5 - 7$) oznaczają tę samą liczbę całkowitą i dlatego trzeba je utożsamiać — robi się to przy pomocy relacji równoważności.

Przykład 104. Definiujemy relację $\sim \subseteq (\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\}))^2$ wzorem

$$\langle a, b \rangle \sim \langle c, d \rangle \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} a \cdot d = b \cdot c.$$

Relacja \sim jest relacją równoważności na $\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})$. Dowód polega na sprawdzeniu wprost z definicji, że \sim jest zwrotna, symetryczna i przechodnia. Zbiór ilorazowy $(\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\}))/\sim$ to nic innego niż zbiór liczb wymiernych \mathbb{Q} , przy czym klasę abstrakcji $[\langle a, b \rangle]_{\sim}$ zwyczajowo oznaczamy $\frac{a}{b}$.

Zadanie 289. Używając kwantyfikatorów, spójników logicznych \vee , \wedge , \Rightarrow , \Leftrightarrow , oraz wyrażeń postaci $x \in A$, $x \notin A$, $R(x, y)$ i $\neg R(x, y)$ zapisz, że relacja R nie jest relacją równoważności na zbiorze A .

Definicja 105. Niech dane będą dwa podziały \mathcal{P}_1 i \mathcal{P}_2 zbioru A . Mówimy, że podział \mathcal{P}_1 jest *drobniejszy* od podziału \mathcal{P}_2 , jeśli dla każdego $X \in \mathcal{P}_1$ istnieje taki $Y \in \mathcal{P}_2$, że $X \subseteq Y$.

Zadanie 290. Napisz bez używania znaku negacji formuły mówiące, że

1. Rodzina $\{X_i\}_{i \in I}$ nie jest podziałem zbioru A . Wolno używać symbolu \neq .
2. Podział \mathcal{P}_1 nie jest drobniejszy od podziału \mathcal{P}_2 . Wolno używać symbolu $\not\subseteq$.

Zadanie 291. Wykaż, że jeśli podział \mathcal{P}_1 jest drobniejszy od podziału \mathcal{P}_2 , to dla każdego $X \in \mathcal{P}_2$ istnieje rodzina $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{P}_1$, taka, że $X = \bigcup \mathcal{R}$.

Zadanie 292. Relacje R i S są relacjami równoważności na tym samym zbiorze. Czy $R \cup S$, $R \cap S$, $R \setminus S$, $R \div S$ też są relacjami równoważności?

Zadanie 293. Czy dla dowolnych relacji równoważności R i S na tym samym zbiorze, relacja $R;S$ też jest relacją równoważności?

Zadanie 294. Niech R i S będą relacjami równoważności na tym samym zbiorze. Udowodnij, że $R \cup S$ jest relacją równoważności wtedy i tylko wtedy, gdy $R \cup S = R;S$.

Zadanie 295. Podaj przykład takich relacji równoważności R i S , że $R;S$ jest a $R \cup S$ nie jest relacją równoważności.

Zadanie 296. Niech R i S będą relacjami równoważności na tym samym zbiorze. Udowodnij, że $R;S$ jest relacją równoważności wtedy i tylko wtedy, gdy $R;S = S;R$.

Zadanie 297. Niech R i S będą dowolnymi relacjami równoważności na zbiorze A . Udowodnij, że $R \cup S$ jest relacją równoważności wtedy i tylko wtedy, gdy dla wszystkich $a \in A$ zachodzi alternatywa $[a]_R \subseteq [a]_S$ lub $[a]_S \subseteq [a]_R$.

Zadanie 298. Niech \mathcal{R} będzie pewną rodziną relacji równoważności określonych na pewnym zbiorze X . Czy $\bigcup \mathcal{R}$ i $\bigcap \mathcal{R}$ są relacjami równoważności na X ?

Zadanie 299. Niech $R \subseteq A^2$ będzie pewną relacją binarną na zbiorze A oraz

$$\begin{aligned}\mathcal{T} &= \{S \subseteq A^2 \mid S \text{ jest zwrotna i przechodnia} \wedge R \subseteq S\}, \\ R^* &= \bigcap \mathcal{T}.\end{aligned}$$

Pokaż, że

1. $R \subseteq R^*$,
2. jeśli S jest relacją zwrotną i przechodnią taką, że $R \subseteq S$, to $R^* \subseteq S$,
3. R^* jest relacją zwrotną i przechodnią.

Relacja R^* jest zatem najmniejszą (w sensie zawierania zbiorów) relacją zwrotną i przechodnią zawierającą relację R .

Definicja 106. Relację R^* nazywamy *zwrotnym i przechodnim domknięciem* R .

Zadanie 300. Niech $Q \subseteq A^2$ będzie dowolną relacją, $Q^0 = I$, gdzie I jest relacją równości na A i niech $Q^{n+1} = Q^n Q$ dla $n \geq 0$. Kładziemy $\hat{Q} = \bigcup_{n=0}^{\infty} Q^n$. Wykaż, że \hat{Q} jest relacją zwrotną i przechodnią.

Zadanie 301. Wykaż, że relacja \hat{Q} z poprzedniego zadania jest zwrotnym i przechodnim domknięciem relacji Q .

Zadanie 302. Korzystając z zadań poprzednich wykaż, że jeśli R jest dowolną relacją oraz $Q = R \cup R^{-1}$, to Q^* jest relacją równoważności.

Zadanie 303. Udowodnij, że jeśli R jest dowolną relacją oraz $Q = R \cup R^{-1}$, to Q^* jest najmniejszą (w sensie relacji inkluzji) relacją równoważności zawierającą relację R .

Zadanie 304. Udowodnij, że jeżeli R jest relacją taką, że R^* zawiera R^{-1} , to R^* jest relacją równoważności.

Zadanie 305. Dane jest przekształcenie $f : A \rightarrow B$. W zbiorze A definiujemy relację \sim wzorem

$$x \sim y \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} f(x) = f(y).$$

Udowodnij, że \sim jest relacją równoważności. Jakie są klasy abstrakcji tej relacji? Podaj warunek konieczny i dostateczny na to, by \sim była identycznością na A .

Zadanie 306. Dane jest przekształcenie $f : A \rightarrow B$ oraz relacja równoważności R na B . W zbiorze A definiujemy relację \sim wzorem

$$x \sim y \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \langle f(x), f(y) \rangle \in R.$$

Udowodnij, że \sim jest relacją równoważności.

Zadanie 307. Ile jest różnych relacji równoważności na zbiorze czteroelementowym? Ile jest różnych relacji równoważności na zbiorze sześćelementowym?

Zadanie 308. W zbiorze $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ definiujemy relacje R_1, R_2, R_3 i R_4 w następujący sposób:

$$\begin{array}{ll} f R_1 g & \text{wtedy i tylko wtedy, gdy } f(57) = g(57), \\ f R_2 g & \text{wtedy i tylko wtedy, gdy } f(57) - g(57) \text{ jest podzielne przez } 57, \\ f R_3 g & \text{wtedy i tylko wtedy, gdy } f(n) = g(n) \text{ dla nieskończenie wielu } n \in \mathbb{N}, \\ f R_4 g & \text{wtedy i tylko wtedy, gdy } f(n) \neq g(n) \text{ dla skończenie wielu } n \in \mathbb{N}. \end{array}$$

Które z relacji R_1, R_2, R_3 i R_4 są relacjami równoważności?

Zadanie 309. Sprawdź, dla jakich liczb naturalnych k podane relacje na zbiorze \mathbb{Z} są zwrotne, symetryczne lub przechodnie. Dla tych z nich, które są relacjami równoważności, opisz ich klasy abstrakcji. Napis $k \mid m$ oznacza, że m jest podzielne przez k , tzn. istnieje takie $i \in \mathbb{Z}$, że $i \cdot k = m$.

$$1. x R_k y \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} k \mid (x + y)$$

$$2. x S_k y \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} k \mid (x - y)$$

$$3. x T_k y \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} x - y = k$$

Zadanie 310. Czy relacja R określona na zbiorze wielomianów jednej zmiennej o współczynnikach naturalnych wzorem

$$p R q \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \text{wielomian } p - q \text{ ma wszystkie współczynniki parzyste}$$

jest relacją równoważności?

Zadanie 311. Dany jest zbiór X i jego podzbiór $C \subseteq X$. Czy relacja R określona na $\mathcal{P}(X)$ wzorem

$$A R B \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} A \div B \subseteq C$$

jest relacją równoważności? Jeśli tak, opisz jej klasy abstrakcji.

Zadanie 312. W zbiorze wszystkich zbieżnych ciągów nieskończonych o wyrazach wymiernych wprowadzamy relację

$$\bar{a} R \bar{b} \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - b_n) = 0$$

Pokaż, że R jest relacją równoważności. Opisz jej klasy abstrakcji.

W poniższych zadaniach udowodnij, że podane relacje $R \subseteq X \times X$ są relacjami równoważności. Opisz ich klasy abstrakcji.

Zadanie 313. $X = \mathcal{P}(\mathbb{N})$,

$$A R B \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} A \div B \text{ jest zbiorem skończonym.}$$

Zadanie 314. $X = \mathbb{N} \times \mathbb{N}$,

$$\langle x_1, y_1 \rangle R \langle x_2, y_2 \rangle \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} x_1 - y_1 = x_2 - y_2.$$

Zadanie 315. $X = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$,

$$\langle x_1, y_1 \rangle R \langle x_2, y_2 \rangle \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} x_1^2 + y_1^2 = x_2^2 + y_2^2.$$

Zadanie 316. $X = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$,

$$\langle x_1, y_1 \rangle R \langle x_2, y_2 \rangle \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} |x_1| + |y_1| = |x_2| + |y_2|.$$

Zadanie 317. $X = \mathcal{P}(\mathbb{N})$,

$$R = \{ \langle A, B \rangle \in \mathcal{P}(\mathbb{N}) \times \mathcal{P}(\mathbb{N}) \mid A = B \vee 0 \notin A \cup B \}.$$

Zadanie 318. Na zbiorze $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ określamy relację równoważności \sim wzorem

$$X \sim Y \quad \text{wtw} \quad X \div Y \text{ jest zbiorem skończonym}$$

(patrz zadanie 313). W zbiorze $\mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim$ definiujemy działania

$$[X]_{\sim} \sqcup [Y]_{\sim} = [X \cup Y]_{\sim}$$

$$[X]_{\sim} \cap [Y]_{\sim} = [X \cap Y]_{\sim}$$

$$[X]_{\sim} - [Y]_{\sim} = [X \setminus Y]_{\sim}$$

Czy powyższe definicje są poprawne?

Zadanie 319. W zbiorze liczb rzeczywistych \mathbb{R} wprowadzamy taką relację \sim , że $x \sim y \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \lfloor x \rfloor = \lfloor y \rfloor$. Udowodnij, że \sim jest relacją równoważności. Opisz jej klasy abstrakcji.

Zadanie 320. W zbiorze \mathbb{R}/\sim , gdzie \sim jest relacją z zadania 319, definiujemy działania arytmetyczne: $[x]_{\sim} + [y]_{\sim} = [x + y]_{\sim}$ oraz $[x]_{\sim} \cdot [y]_{\sim} = [x \cdot y]_{\sim}$. Czy powyższe definicje są poprawne?

Zadanie 321. W zbiorze $(\mathbb{N} \times \mathbb{N})/\sim$, gdzie \sim jest relacją z przykładu 103, definiujemy działania arytmetyczne: $[\langle a, b \rangle]_{\sim} + [\langle c, d \rangle]_{\sim} = [\langle a + c, b + d \rangle]_{\sim}$ oraz $[\langle a, b \rangle]_{\sim} \cdot [\langle c, d \rangle]_{\sim} = [\langle a \cdot c, b \cdot d \rangle]_{\sim}$. Czy powyższe definicje są poprawne?

Zadanie 322. Przyjmijmy $(\mathbb{N} \times \mathbb{N})/\sim$, gdzie \sim jest relacją z przykładu 103, jako definicję zbioru liczb całkowitych \mathbb{Z} . W tym zadaniu chcemy zdefiniować działania odejmowania i mnożenia liczb całkowitych. Zdefiniuj działania arytmetyczne

$$\ominus, \odot : (\mathbb{N} \times \mathbb{N})/\sim \times (\mathbb{N} \times \mathbb{N})/\sim \rightarrow (\mathbb{N} \times \mathbb{N})/\sim$$

tak, aby w naturalny sposób rozszerzały one odejmowanie i mnożenie liczb naturalnych, tzn. dla dowolnych $m, n \in \mathbb{N}$ zachodziły równości:

$$[\langle m, 0 \rangle]_{\sim} \ominus [\langle n, 0 \rangle]_{\sim} = [\langle m, n \rangle]_{\sim},$$

$$[\langle m, 0 \rangle]_{\sim} \odot [\langle n, 0 \rangle]_{\sim} = [\langle mn, 0 \rangle]_{\sim}.$$

Udowodnij, że Twoje definicje są poprawne. Zauważ, że ponieważ właśnie definiujesz odejmowanie i mnożenie liczb całkowitych, nie możesz w definicji korzystać z tych działań (ale możesz korzystać z dodawania i mnożenia liczb naturalnych; odejmowanie liczb naturalnych też nie jest tu dobrym pomysłem).

Zadanie 323. W zadaniu 322 chcieliśmy zdefiniować odejmowanie liczb całkowitych, ale nie wyspecyfikowaliśmy go w pełni. Pokaż, że istnieją różne (poprawne) działania \ominus spełniające równość z zadania 322.

Zadanie 324. Przyjmijmy $(\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\}))/\sim$, gdzie \sim jest relacją z przykładu 104, jako definicję zbioru liczb wymiernych \mathbb{Q} . Definiujemy w tym zbiorze działania arytmetyczne: $[\langle a, b \rangle]_{\sim} + [\langle c, d \rangle]_{\sim} = [\langle a + c, b + d \rangle]_{\sim}$ oraz $[\langle a, b \rangle]_{\sim} \cdot [\langle c, d \rangle]_{\sim} = [\langle a \cdot c, b \cdot d \rangle]_{\sim}$. Czy te definicje są poprawne? Używając jedynie pojęć klasy abstrakcji i standardowych działań na liczbach całkowitych (tj. dodawania, odejmowania i mnożenia) zdefiniuj poprawnie operację dodawania klas abstrakcji tak, by zgadzała się z poznaną w szkole podstawowej operacją dodawania ułamków. Udowodnij, że ta definicja jest poprawna.

Zadanie 325. W zbiorze \mathbb{N}/S_k , gdzie S_k jest relacją zdefiniowaną w zadaniu 309, definiujemy działania $+_k$ i \cdot_k wzorami

$$\begin{aligned} [x]_{S_k} +_k [y]_{S_k} &= [x + y]_{S_k} \\ [x]_{S_k} \cdot_k [y]_{S_k} &= [xy]_{S_k} \end{aligned}$$

Sprawdź, dla jakich liczb k te definicje są poprawne.

8

Teoria mocy

8.1. Równoliczność zbiorów

Definicja 107. Zbiory A i B są równoliczne, jeżeli istnieje bijekcja $f : A \rightarrow B$. Piszemy wówczas $A \sim B$.

Przykład 108. Następujące zbiory są równoliczne:

- zbiór par liczb naturalnych i zbiór liczb naturalnych: $\mathbb{N} \times \mathbb{N} \sim \mathbb{N}$;
- zbiór liczb naturalnych i zbiór liczb naturalnych parzystych: $\mathbb{N} \sim \mathbb{P}$;
- dowolny niepusty przedział $(a, b) \subseteq \mathbb{R}$ i odcinek $(0, 1)$: $(a, b) \sim (0, 1)$.

Niech \mathbb{N} , \mathbb{Z} , \mathbb{Q} i \mathbb{R} oznaczają zbiory, odpowiednio, liczb naturalnych, całkowitych, wymiernych i rzeczywistych, $m \perp n$ oznacza, że m i n są względnie pierwsze oraz

(a, b)	oznacza zbiór	$\{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$,
$[a, b)$	oznacza zbiór	$\{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x < b\}$,
$(a, b]$	oznacza zbiór	$\{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}$,
$[a, b]$	oznacza zbiór	$\{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$,
(a, ∞)	oznacza zbiór	$\{x \in \mathbb{R} \mid a < x\}$,
$O((a, b), r)$	oznacza zbiór	$\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid (x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2\}$,
\mathbb{N}^+	oznacza zbiór	$\{n \in \mathbb{N} \mid n > 0\}$,
\mathbb{Q}^+	oznacza zbiór	$\{q \in \mathbb{Q} \mid q > 0\}$
\underline{n}	oznacza zbiór	$\{i \in \mathbb{N} \mid i < n\}$.

Konstruując odpowiednie bijekcje udowodnij, że zbiory podane w poniższych zadaniach są równoliczne.

Zadanie 326. $[0, 1)$ oraz $O((0, 0), 1)$

Zadanie 327. $(0, 1)$ oraz $[1, 2]$

Zadanie 328. $(0, 1)$ oraz \mathbb{R}

Zadanie 329. $[0, 1)$ oraz $[0, \infty)$

Zadanie 330. $(0, 1)$ oraz $[0, 1)$

Zadanie 331. $[0, 1)$ oraz \mathbb{R}

Zadanie 332. $[0, 1)$ oraz $(0, \infty)$

Zadanie 333. \mathbb{R} oraz $\mathbb{R} \setminus \mathbb{N}$

Zadanie 334. \mathbb{Q} oraz \mathbb{Q}^+

Zadanie 335. \mathbb{Q} oraz $\mathbb{Q} \setminus [0, 1]$

Zadanie 336. \mathbb{N} oraz \mathbb{Z}

Zadanie 337. \mathbb{N} oraz \mathbb{N}^2

Zadanie 338. \mathbb{N} oraz \mathbb{N}^3

Zadanie 339. \mathbb{N} oraz $\{\langle n, m \rangle \in \mathbb{N}^+ \times \mathbb{N}^+ \mid m \perp n\}$

Zadanie 340. $\{\langle n, m \rangle \in \mathbb{N}^+ \times \mathbb{N}^+ \mid m \perp n\}$ oraz \mathbb{Q}^+

Zadanie 341. \mathbb{N} oraz \mathbb{Q}

Zadanie 342. $\mathbb{Z} \times ((0, 1] \cap \mathbb{Q})$ oraz \mathbb{Q}

Zadanie 343. \mathbb{R} oraz $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$

Zadanie 344. $(0, 1] \times \mathbb{Z}$ oraz \mathbb{R}

Zadanie 345. $(0, 1) \times (0, 1)$ oraz $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$

Zadanie 346. $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ oraz $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$

Zadanie 347. $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ oraz $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$

Zadanie 348. $\{x \in \mathbb{R} \mid \sin(x) = 0\}$ oraz \mathbb{Z}

Zadanie 349. $[0, 1] \times \mathcal{P}([2, 3])$ oraz $\mathcal{P}([0, 1]) \times [2, 3]$

Zadanie 350. $\bigcup_{i=0}^{n-1} \{0, 1\}^i$ oraz $\mathcal{P}(\underline{n}) \setminus \{\emptyset\}$

Zadanie 351. Niech R_1 i R_2 będą takimi relacjami równoważności na A , że $R_1 \cap R_2 = I_A$ oraz $R_1; R_2 = A \times A$ (tutaj I_A jest relacją identyczności na zbiorze A). Dla $i \in \{1, 2\}$ niech A/R_i będzie rodziną klas abstrakcji relacji R_i , tzn. $A/R_i = \{[a]_{R_i} \mid a \in A\}$. Udowodnij, że zbiór A jest równoliczny z produktem kartezjańskim $A/R_1 \times A/R_2$.

8.2. Własności pojęcia równoliczności zbiorów

Twierdzenie 109. Dla dowolnych zbiorów A, B, C

1. $A \sim A$,
2. Jeśli $A \sim B$ to $B \sim A$,
3. Jeśli $A \sim B$ oraz $B \sim C$ to $A \sim C$.

Zadanie 352. Wykaż, że jeśli $A_1 \sim A_2$, to

$$\mathcal{P}(A_1) \sim \mathcal{P}(A_2), \quad (1)$$

$$B^{A_1} \sim B^{A_2}, \quad (2)$$

$$A_1^B \sim A_2^B, \quad (3)$$

$$A_1 \times B \sim A_2 \times B. \quad (4)$$

Zadanie 353. Wykaż, że

$$(A^B)^C \sim A^{(B \times C)}, \quad (1)$$

$$(A \times B)^C \sim A^C \times B^C, \quad (2)$$

$$A \times \{a\} \sim A, \quad (3)$$

$$A^{\{a\}} \sim A, \quad (4)$$

dla dowolnych zbiorów A, B, C i jednoelementowego zbioru $\{a\}$.

Zadanie 354. Wykaż, że jeśli $A_1 \cap B_1 = A_2 \cap B_2 = \emptyset$ oraz $A_1 \sim A_2$ i $B_1 \sim B_2$, to

$$A_1 \cup B_1 \sim A_2 \cup B_2, \quad (1)$$

$$C^{A_1 \cup B_1} \sim C^{A_2} \times C^{B_2}. \quad (2)$$

Powyższe własności uwalniają nas od konieczności żmudnego konstruowania odpowiednich bijekcji, pozwalając w łatwy sposób wyprowadzać nowe fakty na temat równoliczności zbiorów z już poznanych. Dla przykładu skoro $\mathbb{N} \sim \mathbb{Q}$ (zadanie 341), to na mocy własności (2) z zadania 352 wnioskujemy, że $\mathbb{R}^{\mathbb{N}} \sim \mathbb{R}^{\mathbb{Q}}$.

Zadanie 355. Przyjmując za wiadome, że $\mathbb{N} \sim \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ oraz $\mathbb{R} \sim \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ udowodnij, że $\mathbb{R}^{\mathbb{N}} \sim \mathbb{R}$.

8.3. Zbiory skończone

Definicja 110. Zbiór A jest *zbiorem skończonym*, jeśli istnieje taka liczba naturalna $n \in \mathbb{N}$, że $A \sim \underline{n}$. Zbiór, który nie jest skończony nazywamy *nieskończonym*.

Definicja 111. *Skończonym ciągiem elementów zbioru A nazywamy dowolną funkcję $a : \underline{n} \rightarrow A$, gdzie $n \in \mathbb{N}$. Liczbę n nazywamy wtedy *długością* ciągu a . Często zamiast $a(i)$ będziemy pisać a_i .*

Twierdzenie 112.

1. Dla żadnego $n \in \mathbb{N}$ nie istnieje funkcja różnowartościowa z $\underline{n+1}$ w \underline{n} .
2. Jeżeli istnieje funkcja różnowartościowa z \underline{m} w \underline{n} , to $\underline{m} \subseteq \underline{n}$.
3. Jeżeli $\underline{m} \sim \underline{n}$, to $m = n$.
4. Dla każdego $m \in \mathbb{N}$ zachodzi $\underline{m} \not\sim \mathbb{N}$.

Jeśli więc zbiór A jest skończony, to istnieje dokładnie jedna taka liczba naturalna n , że $A \sim \underline{n}$.

Definicja 113. Niech A będzie zbiorem skończonym. Liczbę n taką, że $A \sim \underline{n}$ nazywamy *liczbą elementów* zbioru A i oznaczamy $|A|$. Liczbę elementów zbioru $|A|$ nazywamy też *mocą* zbioru A zwłaszcza gdy jednocześnie zajmujemy się zbiorami skończonymi i nieskończonymi.

Zbiór pusty ma zatem 0 elementów. Zbiór ma n elementów, jeżeli jego elementy można ponumerować bez powtórzeń liczbami $0, \dots, n-1$.

Zadanie 356. Udowodnij, że podzbiór zbioru skończonego jest skończony

Zadanie 357. Udowodnij, że dla dowolnych liczb naturalnych $m, n \in \mathbb{N}$ jest

$$(\underline{m} \times \{0\}) \cup (\underline{n} \times \{1\}) \sim \underline{m+n}.$$

Wyprowadź stąd wniosek, że dla dowolnych skończonych rozłącznych zbiorów A i B zachodzi równość $|A \cup B| = |A| + |B|$.

Zadanie 358. Udowodnij, że suma dwóch skończonych zbiorów jest zbiorem skończonym.

Zadanie 359. Wykaż, że jeśli zbiory A i B są skończone, to $|A \times B| = |A| \cdot |B|$.

Zadanie 360. Wykaż, że jeśli zbiory A i B są skończone, to $|A^B| = |A|^{|B|}$.

Zadanie 361. Niech $A^1 = A$ oraz $A^{n+1} = A^n \times A$. Wykaż, że $A^n \sim A^n$.

Zadanie 362. Dla jakich skończonych zbiorów A, B i C :

1. $A^B \sim B^A$?
2. $A^{B \cup C} \sim A^B \cup A^C$?

Zadanie 363. Czy istnieją takie zbiory A, B, C, D , że $A \not\sim B$ oraz $C \not\sim D$, ale $A^C \sim B^D$?

Zadanie 364. Niech $\{A_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ będzie rodziną podzbiorów zbioru X . Niech (1) oznacza, że A_0 jest zbiorem skończonym, oraz (2) oznacza, że dla każdego n zachodzi $\bigcap_{i=0}^n A_i \neq \emptyset$. Pokaż, że: a) jeśli zachodzi (1) i (2), to $\bigcap_{i=0}^{\infty} A_i \neq \emptyset$, b) istnieje taka rodzina zbiorów $\{A_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ spełniająca warunek (2), że $\bigcap_{i=0}^{\infty} A_i = \emptyset$.

Zadanie 365. Niech $\{A_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ będzie rodziną skończonych podzbiorów zbioru X , taką, że $A_{n_1} \cap \dots \cap A_{n_k} \neq \emptyset$ dla dowolnych $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}$. Pokaż, że $\bigcap_{i=1}^{\infty} A_i \neq \emptyset$.

Zadanie 366. Dane są dwie funkcje $f : A \rightarrow B$ i $g : B \rightarrow A$, obie typu „na”.

1. Czy z powyższych założeń wynika, że f i g są bijekcjami?
2. Jeśli dodatkowo A i B są zbiorami skończonymi, to czy wówczas f i g są bijekcjami?

Zadanie 367. Dane są zbiory A_1, \dots, A_n . Przypuśćmy, że \mathcal{R} jest najmniejszą rodziną zbiorów o tej własności, że $A_i \in \mathcal{R}$ dla $i = 1, \dots, n$ oraz jeśli $X, Y \in \mathcal{R}$, to $X \cup Y \in \mathcal{R}$. Wyznacz maksymalną moc rodziny \mathcal{R} .

Zadanie 368. Dane są zbiory A_1, \dots, A_n . Przypuśćmy, że \mathcal{R} jest najmniejszą rodziną zbiorów o tej własności, że $A_i \in \mathcal{R}$ dla $i = 1, \dots, n$ oraz jeśli $X, Y \in \mathcal{R}$, to $X \cup Y \in \mathcal{R}$ i $X \cap Y \in \mathcal{R}$. Wyznacz maksymalną moc rodziny \mathcal{R} . Dla jakich zbiorów A_1, \dots, A_n wartość $|\mathcal{R}|$ jest największa?

Zadanie 369. Dane są zbiory A_1, \dots, A_n . Przypuśćmy, że \mathcal{R} jest najmniejszą rodziną zbiorów o tej własności, że $A_i \in \mathcal{R}$ dla $i = 1, \dots, n$ oraz jeśli $X, Y \in \mathcal{R}$, to $X \cup Y \in \mathcal{R}$ i $X \setminus Y \in \mathcal{R}$. Wyznacz maksymalną moc rodziny \mathcal{R} . Dla jakich zbiorów A_1, \dots, A_n wartość $|\mathcal{R}|$ jest największa?

Definicja 114. Przyjmujemy następujące oznaczenia: dla dowolnego zbioru $X \subseteq A$ napis X^1 oznacza zbiór X , zaś napis X^0 oznacza dopełnienie zbioru X do zbioru A , tj. zbiór $A \setminus X$.

Zadanie 370. Dany jest zbiór A i dodatnia liczba naturalna k oraz takie zbiory $X_i \subseteq A$ dla $i = 1, \dots, k$, że dla każdej funkcji $f : \{1, \dots, k\} \rightarrow \{0, 1\}$ zbiór $\bigcap_{i=1}^k X_i^{f(i)}$ ma co najwyżej 1 element. Wyznacz maksymalną moc zbioru A .

Definicja 115. Mówimy, że funkcja dwuargumentowa $f : A \times B \rightarrow C$ istotnie zależy od każdego z argumentów, jeśli istnieją takie elementy $a \in A$ i $b_1, b_2 \in B$, że $f(a, b_1) \neq f(a, b_2)$ oraz istnieją takie elementy $a_1, a_2 \in A$ i $b \in B$, że $f(a_1, b) \neq f(a_2, b)$.

Zadanie 371. Ile jest dwuargumentowych funkcji logicznych istotnie zależnych od każdego z argumentów? Ile jest funkcji $f : A \times B \rightarrow C$ istotnie zależnych od każdego z argumentów, gdy każdy ze zbiorów A, B, C ma 3 elementy?

Zadanie 372. Ile jest funkcji $f : A \times B \rightarrow C$ istotnie zależnych od każdego z argumentów, gdy każdy ze zbiorów A, B ma 4 elementy, a C ma n elementów?

Zadanie 373. a) Na prywatce u Jurka jest co najmniej jedna osoba znająca co najmniej jeden z sześciu języków: polski, angielski, francuski, niemiecki, rosyjski i hiszpański. Ponadto nie ma dwóch osób, które znałyby dokładnie te same języki. Oczywiście każdy gość Jurka zna co najmniej dwa języki. Oszacuj z góry i z dołu liczbę osób na prywatce u Jurka.

b) Na prywatce u Agaty jest co najmniej jedna osoba znająca co najmniej jeden z n języków. Ponadto nie ma dwóch osób, które znałyby dokładnie te same języki. Oczywiście każdy gość Agaty zna co najmniej jeden język. Oszacuj z góry i z dołu liczbę osób na prywatce u Agaty.

Zadanie 374. Funkcję f określoną w pewnej dziedzinie $\text{dom}(f) \subseteq \mathcal{P}(A)$ i przyjmującą wartości ze zbioru $\{0, 1\}$ nazywamy *funkcją parzystości w zbiorze $\mathcal{P}(A)$* , jeżeli

1. dla dowolnych $X \in \text{dom}(f)$ i $x \in A$ także $X \cup \{x\} \in \text{dom}(f)$ oraz $X \setminus \{x\} \in \text{dom}(f)$,
2. $\emptyset \in \text{dom}(f)$ oraz $f(\emptyset) = 0$,
3. dla dowolnego $X \in \text{dom}(f)$ i dowolnego $x \in A \setminus X$ zachodzi równość

$$f(X \cup \{x\}) = 1 - f(X).$$

Wykaż, że na zbiorze $\mathcal{P}(A)$ istnieje dokładnie jedna funkcja parzystości wtedy i tylko wtedy, gdy A jest zbiorem skończonym.

Zadanie 375. Pokaż, że zbiór wartości dowolnej nierosnącej funkcji

$$f : \mathbb{N} \rightarrow \left\{ n + \frac{m}{m+1} \mid n, m \in \mathbb{N} \right\}$$

jest skończony.

8.3.1. Wzór włączeń i wyłączeń

Zadanie 376. Pośród członków pewnego klubu lingwistycznego każdy uczy się francuskiego, niemieckiego lub hiszpańskiego. Wiadomo, że 20 uczy się francuskiego, 12 francuskiego i hiszpańskiego, 16 niemieckiego, 16 hiszpańskiego, 4 francuskiego i niemieckiego, 7 niemieckiego i hiszpańskiego, 3 wszystkich trzech języków. Ilu członków liczy klub? Ilu z nich uczy się dokładnie dwóch języków?

Zadanie 377. Korzystając z tego, iż jeżeli zbiory skończone A i B są rozłączne, to $|A \cup B| = |A| + |B|$ udowodnij, że dla dowolnych zbiorów A, B i C (niekoniecznie rozłącznych):

$$\begin{aligned} |A \cup B| &= |A| + |B| - |A \cap B| \\ |A \cup B \cup C| &= |A| + |B| + |C| - |A \cap B| - |A \cap C| - |B \cap C| + |A \cap B \cap C| \end{aligned}$$

Zadanie 378. Udowodnij indukcyjnie, że dla dowolnej rodziny zbiorów skończonych $\{A_i\}_{i=1}^n$ jest prawdziwy tzw. *wzór włączeń i wyłączeń*:

$$\left| \bigcup_{i=1}^n A_i \right| = \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{I \subseteq \{1, \dots, n\} \\ |I|=j}} (-1)^{j+1} \left| \bigcap_{i \in I} A_i \right|.$$

Zadanie 379. Rodzina $\{A_i\}_{i=1}^n$ jest rodziną zbiorów k -rozłącznych, jeśli dla każdego rosnącego ciągu liczb naturalnych $\langle i_1, i_2, \dots, i_k \rangle$ takiego, że $i_k \leq n$, mamy

$$\bigcap_{j=1}^k A_{i_j} = \emptyset.$$

Udowodnij, że dla dowolnej rodziny zbiorów skończonych k -rozłącznych $\{A_i\}_{i=1}^n$ jest prawdziwy wzór:

$$\left| \bigcup_{i=1}^n A_i \right| = \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{\substack{I \subseteq \{1, \dots, n\} \\ |I|=j}} (-1)^{j+1} \left| \bigcap_{i \in I} A_i \right|.$$

8.4. Moce zbiorów nieskończonych

Symbol $|A|$ zdefiniowaliśmy jedynie dla zbiorów skończonych. W teorii mocy definiuje się obiekty oznaczające „liczbę elementów” zbiorów nieskończonych, zwane *liczbami kardynalnymi*. Pozwala to rozszerzyć odwzorowanie $|\cdot|$ na zbiory nieskończone. Robimy to w ten sposób, że dwóm zbiorom przypisujemy tę samą liczbę kardynalną wtedy i tylko wtedy, gdy zbiory te są równoliczne. Wartość $|A|$ nazywamy wówczas *mocą* zbioru A . Moc zbioru liczb naturalnych (a więc i dowolnego zbioru równolicznego ze zbiorem liczb naturalnych) oznaczamy \aleph_0 (czytamy „alef zero”). Poniżej pokazujemy, że $\mathbb{N} \not\sim \mathbb{R}$. Moc zbioru liczb rzeczywistych nazywamy continuum i oznaczamy przez \mathfrak{c} . Mamy zatem $|\mathbb{N}| = \aleph_0$, $|\mathbb{R}| = \mathfrak{c}$ oraz $\aleph_0 \neq \mathfrak{c}$.

Definicja 116. Zbiór jest *przeliczalny*, jeśli jest skończony lub jest równoliczny ze zbiorem liczb naturalnych.

Definicja 117. Zbiór równoliczny ze zbiorem liczb rzeczywistych nazywamy *zbiorem mocy continuum*.

Nierównolicznych zbiorów nieskończonych jest nieskończenie wiele. Jest więc nieskończenie wiele różnych nieskończonych liczb kardynalnych. Można na nich określić operacje dodawania, mnożenia i potęgowania oraz relację porządku mające podobne własności, jak odpowiadające im operacje na liczbach naturalnych. Teoria takich liczb nazywa się *arytmetyką liczb kardynalnych*. Tak subtelne teorie mają jednak niewiele zastosowań w informatyce, dlatego nam wystarczą jedynie pojęcia równoliczności, przeliczalności i mocy continuum. Tam, gdzie nie jest to niezbędne, nie należy więc używać pojęcia mocy $|A|$ zbioru A (formalnie nie zdefiniowaliśmy przecież tego obiektu!). W szczególności zamiast pisać $|A| = |B|$ lepiej napisać $A \sim B$. Oba wyrażenia oznaczają bowiem, że zbiory A i B są równoliczne, drugie jednak nie odwołuje się do (dosyć skomplikowanego) pojęcia liczby kardynalnej.

Definicja 118. Mówimy, że moc zbioru A jest nie większa niż moc zbioru B i piszemy $A \preceq B$, jeśli istnieje funkcja różnowartościowa $f : A \rightarrow B$.

Definicja 119. Mówimy, że moc zbioru A jest mniejsza niż moc zbioru B i piszemy $A \prec B$, jeśli $A \preceq B$ oraz $A \not\sim B$.

Twierdzenie 120.

1. Dla dowolnego zbioru A zachodzi $A \preceq A$.
2. Jeśli $A \preceq B$ i $B \preceq C$, to $A \preceq C$.
3. Jeśli $n < m$, to $\underline{n} \prec \underline{m}$.
4. Dla dowolnej liczby naturalnej n zachodzi $\underline{n} \prec \mathbb{N}$.

Twierdzenie 121 (Cantor-Bernstein). Jeśli $A \preceq B$ oraz $B \preceq A$, to $A \sim B$.

Twierdzenie 122. Zbiór liczb rzeczywistych jest równoliczny ze zbiorem $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$. Zatem zbiór $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ ma moc continuum.

Definicja 123. Jeśli $X \subseteq A$, to $f : A \rightarrow \{0, 1\}$ jest *funkcją charakterystyczną* zbioru X , jeśli

$$f(a) = \begin{cases} 0, & \text{gdy } a \notin X, \\ 1, & \text{gdy } a \in X, \end{cases}$$

dla dowolnego $a \in A$.

Fakt 124. Dla dowolnego zbioru A zachodzi $2^A \sim \mathcal{P}(A)$.

Twierdzenie 125 (Cantor). Dla żadnego zbioru A nie istnieje funkcja z A na zbiór potęgowy $\mathcal{P}(A)$.

Dowód. Przypuśćmy przeciwnie, że pewna funkcja $f : A \rightarrow \mathcal{P}(A)$ przekształca A na $\mathcal{P}(A)$. Niech

$$A_0 = \{a \in A \mid a \notin f(a)\}.$$

Ponieważ $A_0 \subseteq A$ i f odwzorowuje A na $\mathcal{P}(A)$, więc istnieją takie $a_0 \in A$, że $f(a_0) = A_0$. Mamy wtedy

$$a_0 \in A_0 \Leftrightarrow a_0 \in f(a_0) \Leftrightarrow a_0 \notin A_0.$$

Założenie istnienia funkcji f doprowadziło do sprzeczności. ■

Dowód (twierdzenia Cantora dla przypadku $A = \mathbb{N}$). Przypuśćmy przeciwnie, że pewna funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \underline{2}^{\mathbb{N}}$ przekształca \mathbb{N} na $\underline{2}^{\mathbb{N}}$. Tworzymy nieskończoną tablicę

$(f(0))(0)$	$(f(0))(1)$	$(f(0))(2)$	$(f(0))(3)$	$(f(0))(4)$	\dots
$(f(1))(0)$	$(f(1))(1)$	$(f(1))(2)$	$(f(1))(3)$	$(f(1))(4)$	\dots
$(f(2))(0)$	$(f(2))(1)$	$(f(2))(2)$	$(f(2))(3)$	$(f(2))(4)$	\dots
$(f(3))(0)$	$(f(3))(1)$	$(f(3))(2)$	$(f(3))(3)$	$(f(3))(4)$	\dots
$(f(4))(0)$	$(f(4))(1)$	$(f(4))(2)$	$(f(4))(3)$	$(f(4))(4)$	\dots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots

Tworzymy nową funkcję charakterystyczną

$$g(i) = 1 - (f(i))(i)$$

dla każdego $i \in \mathbb{N}$. Wtedy $g \neq f(i)$ dla dowolnego $i \in \mathbb{N}$, gdyż $g(i) = 1 - (f(i))(i) \neq (f(i))(i)$. Otrzymaliśmy sprzeczność z założeniem, że f jest *na*. ■

Technika dowodzenia, której użyliśmy w powyższym dowodzie nazywana jest *metodą przekątniową*. Pokazaliśmy w niej, że odpowiednio zmodyfikowany ciąg znajdujący się na przekątnej jest inny niż wszystkie pozostałe rozważane ciągi. Warto ją zapamiętać, bo w przyszłości pojawi się ona na innych przedmiotach, np. do udowodnienia, że nie istnieje program komputerowy, który dla danego na wejściu programu sprawdza, czy ten się zapętla.

Zadanie 380. Używając metody przekątniowej pokaż, że zbiory \mathbb{N} i \mathbb{R} nie są równoliczne.

Twierdzenie 126. Dla każdego A zachodzi $A \prec \mathcal{P}(A)$.

Niektóre z zadań poniżej wymagają użycia *aksjomatu wyboru*. Jest to aksjomat teorii mnogości mówiący, że dla każdej indeksowanej rodziny $\{A_i\}_{i \in I}$ niepustych zbiorów istnieje funkcja $f : I \rightarrow \bigcup_{i \in I} A_i$, zwana *funkcją wyboru*, która każdemu indeksowi $i \in I$ przyporządkowuje element $f(i)$ zbioru A_i . Aksjomat wyboru jest niekonstruktywny (nie wiadomo jak skonstruować funkcję wyboru; można też z niego wyprowadzić prawo wyłączonego środka) i jest kontrowersyjny. Korzystając z niego (razem z pozostałymi aksjomatami teorii mnogości) można dokonać *paradoksalnego rozkładu kuli*: zwykłą kulę w przestrzeni trójwymiarowej można podzielić na sześć części w taki sposób, że z tych części, używając tylko obrotów i przesunięć, można złożyć dwie kule takie same jak kula początkowa. Dlatego wielu współczesnych matematyków odrzuca ten aksjomat.

Zadanie 381. Udowodnij, że jeśli zbiory A i B są niepuste, to $A \preceq B$ wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje funkcja $f : B \rightarrow A$, która jest „na”. (Zadanie wymaga pewnika wyboru.)

Zadanie 382. Udowodnij, że jeżeli $A \subseteq B$, to $A \preceq B$.

Zadanie 383. Czy $A_1 \sim A_2$, $B_1 \sim B_2$ i $A_1 \preceq B_1$, implikuje, że $A_2 \preceq B_2$?

Zadanie 384. Udowodnij, że A jest zbiorem nieskończonym wtedy i tylko wtedy, gdy zawiera podzbiór równoliczny ze zbiorem liczb naturalnych, tj. gdy istnieje taki zbiór $B \subseteq A$, że $B \sim \mathbb{N}$. (Uwaga: zadanie jest trudne, a dowód wymaga skorzystania z pewnika wyboru).

Zadanie 385. Udowodnij, że A jest zbiorem nieskończonym wtedy i tylko wtedy, gdy jest równoliczny ze swoim właściwym podzbiorem, tj. gdy istnieje taki zbiór $B \subseteq A$, że $B \neq A$ i $A \sim B$. (Uwaga: zadanie jest trudne, a dowód wymaga skorzystania z pewnika wyboru).

Zadanie 386. Udowodnij, że niepusty zbiór A jest nieskończony wtedy i tylko wtedy, gdy istnieją zbiory B i C takie, że $B \cap C = \emptyset$, $B \cup C = A$ i $A \sim B \sim C$. (Uwaga: zadanie jest trudne, a dowód wymaga skorzystania z pewnika wyboru).

Zadanie 387. Wykaż, że istnieje nieskończona rodzina zbiorów nieskończonych o tej własności, że żadne dwa spośród jej elementów nie są równoliczne.

Twierdzenie Cantora-Bernsteina pozwala ustalać równoliczność zbiorów za pomocą konstrukcji dwóch funkcji różnowartościowych. Zbudowanie takich funkcji jest często znacznie łatwiejsze niż skonstruowanie bijekcji przekształcającej jeden zbiór na drugi. W poniższych zadaniach konstruując dwie funkcje różnowartościowe udowodnij równoliczność podanych zbiorów.

Zadanie 388. $(0, 1]$ oraz $(0, 1]^2$

Zadanie 389. $(0, 1)$ oraz $(1, 2]$

Zadanie 390. $(0, 1]$ oraz $\mathbb{Z}^{\mathbb{N}}$

Zadanie 391. \mathbb{N} oraz $\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}$

Zadanie 392. $\mathbb{Z} \times \mathbb{N}^+$ oraz \mathbb{Q}

Zadanie 393. $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ oraz $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$

Zadanie 394. \mathbb{R} oraz $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$

Zadanie 395. \mathbb{N} oraz $\{f : \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\} \mid f \text{ jest nierosnąca}\}$

Zadanie 396. \mathbb{N} oraz $\{f : \mathbb{N} \rightarrow \{1, 2, 3, 4\} \mid f \text{ jest niemalejąca}\}$

Zadanie 397. \mathbb{Q} oraz $\mathbb{Q} \times \mathbb{Q}$

Zadanie 398. $(0, 1)$ oraz $(0, 1) \times (0, 1)$

Zadanie 399. \mathbb{R} oraz $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$

8.5. Wyznaczanie mocy zbiorów

Zadanie 400. Udowodnij, że dla każdej dodatniej liczby naturalnej n zbiór \mathbb{R}^n , gdzie \mathbb{R} jest zbiorem liczb rzeczywistych, ma moc continuum.

Zadanie 401. Niech $R_I(x, y)$ oznacza relację zdefiniowaną formułą

$$\exists p \in I ((\phi(p, x) \wedge \neg \phi(p, y)) \vee (\phi(p, y) \wedge \neg \phi(p, x)))$$

na $\mathbb{N}^+ \times \mathbb{N}^+$, gdzie $\mathbb{N}^+ = \mathbb{N} \setminus \{0\}$, I jest skończonym niepustym zbiorem liczb pierwszych, a $\phi(x, y)$ jest formułą $\exists z (x \cdot z = y)$. Niech $Q_I = (\mathbb{N}^+ \times \mathbb{N}^+) \setminus R_I$.

- Czy R_I jest relacją równoważności? Jeśli tak, podaj liczbę klas abstrakcji relacji R_I .
- Czy Q_I jest relacją równoważności? Jeśli tak, podaj liczbę klas abstrakcji relacji Q_I .

Zadanie 402. Dla danej funkcji $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ definiujemy zbiór

$$A_f = \{n \in \mathbb{N} \mid f(n) > 1\}.$$

Niech $\mathcal{A} = \{A_f \mid f \in \mathbb{N}^{\mathbb{N}}\}$. Znajdź moc zbiorów \mathcal{A} oraz $\bigcup_{f \in \mathbb{N}^{\mathbb{N}}} A_f$.

Zadanie 403. Dla ciągu nieskończonego $a = \langle a_1, a_2, a_3, \dots \rangle$ o wyrazach naturalnych określamy relację R_a w taki sposób, że dla dwóch ciągów nieskończonych o wyrazach naturalnych $b = \langle b_1, b_2, b_3, \dots \rangle$ i $c = \langle c_1, c_2, c_3, \dots \rangle$ zachodzi $b R_a c$, wtedy i tylko wtedy, gdy

$$\forall n \in \mathbb{N} (a_n = 0 \Rightarrow b_n = c_n).$$

1. Pokaż, że niezależnie od wyboru ciągu a relacja R_a jest relacją równoważności.
2. Jaka jest moc zbioru takich ciągów a , dla których wszystkie klasy abstrakcji R_a są przeliczalne?
3. Jaka jest moc zbioru takich ciągów a , dla których relacja R_a ma przeliczalnie wiele klas abstrakcji?
4. Jaka jest moc zbioru takich ciągów a , dla których relacja R_a ma continuum klas abstrakcji i każda z tych klas jest mocy continuum?
5. Jaka jest moc zbioru takich ciągów a , dla których relacja R_a ma przeliczalnie wiele klas abstrakcji i każda z tych klas jest przeliczalna?
6. Jaka jest moc zbioru takich ciągów a , dla których relacja R_a ma zarówno przeliczalne, jak i nieprzeliczalne klasy abstrakcji?

Zadanie 404. Niech $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ będzie dowolną rodziną podzbiorów zbioru \mathbb{N} .

1. Czy istnieje taki nieskończony ciąg zerojedynkowy $(i_n)_{n \in \mathbb{N}}$, że

$$\bigcap_{n=0}^{\infty} X_n^{i_n} \neq \emptyset?$$

2. Jaka jest maksymalna moc zbioru wszystkich ciągów $(i_n)_{n \in \mathbb{N}}$ spełniających powyższy wzór?

Zadanie 405. Rozważamy relację \sim określoną na funkcjach ze zbioru $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ w następujący sposób:

$$f \sim g \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \exists c > 0 \exists k > 0 \forall n > k (f(n) \leq cg(n) \wedge g(n) \leq cf(n)).$$

1. Pokaż, że \sim jest relacją równoważności.
2. Jaka jest moc klasy abstrakcji takiej funkcji f , że $f(n) = 0$ dla każdego $n \in \mathbb{N}$?
3. Jaka jest moc klasy abstrakcji takiej funkcji g , że $g(n) = 1$ dla każdego $n \in \mathbb{N}$?

Zadanie 406. Dla każdej spośród relacji opisanych w zadaniu 308, która jest relacją równoważności wyznacz moc zbioru jej klas abstrakcji oraz moc każdej z jej klas.

Zadanie 407. W zbiorze \underline{n} wprowadzamy relację równoważności $k \simeq l \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} 2|k - l$.

1. Ile klas abstrakcji ma relacja \simeq ?
2. Ile elementów mają klasy abstrakcji $[0]_{\simeq}$ i $[1]_{\simeq}$?
3. Na klasach abstrakcji definiujemy działanie $[k]_{\simeq} + [l]_{\simeq} = [(k + l) \bmod n]_{\simeq}$. Dla jakich n to działanie jest poprawne?

8.6. Zbiory przeliczalne

Twierdzenie 127. Zbiór A jest przeliczalny wtedy i tylko wtedy, gdy $A = \emptyset$ lub istnieje funkcja z \mathbb{N} na A .

Definicja 128. *Ciągiem elementów zbioru A* nazywamy funkcję $f : \mathbb{N} \rightarrow A$.

Zbiór niepusty jest przeliczalny, gdy wszystkie jego elementy można ustawić w ciąg (być może z powtórzeniami).

Twierdzenie 129.

1. Podzbiór zbioru przeliczalnego jest przeliczalny.
2. Jeśli $f : A \rightarrow B$ oraz $X \subseteq A$ jest zbiorem przeliczalnym, to $f[X]$ też jest zbiorem przeliczalnym.
3. Jeśli A i B są przeliczalne, to $A \times B$ jest przeliczalny.
4. Jeśli $\{A_i\}_{i \in I}$ jest przeliczalną rodziną zbiorów przeliczalnych (tzn. I jest przeliczalny i każdy ze zbiorów A_i jest przeliczalny), to $\bigcup_{i \in I} A_i$ jest zbiorem przeliczalnym.

Zadanie 408. Udowodnij, że zbiór A jest przeliczalny wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje podzbiór zbioru \mathbb{N} równoliczny z A . Wywnioskuj stąd, że A jest przeliczalny wtedy i tylko wtedy, gdy $A \preceq \mathbb{N}$.

Zadanie 409. Niech \mathcal{A} będzie niepustą przeliczalną rodziną zbiorów przeliczalnych. Pokaż, że $\bigcup \mathcal{A}$ i $\bigcap \mathcal{A}$ są zbiorami przeliczalnymi. Czy założenie o niepustości \mathcal{A} jest istotne?

Zadanie 410. Niech $A \subseteq \mathbb{N}$ będzie zbiorem nieskończonym. Zdefiniuj bijekcje $f : A \rightarrow \mathbb{N}$ i $g : \mathbb{N} \rightarrow A$.

Zadanie 411. Niech A będzie nieskończonym zbiorem przeliczalnym i niech $f : A \rightarrow B$ będzie surjekcją (odwzorowaniem “na”). Zbuduj injekcję (funkcję różnowartościową) $g : B \rightarrow A$.

Zadanie 412. Udowodnij, że jeśli $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ jest niemalejąca (czyli $f(x) \leq f(y)$ dla wszystkich $x \leq y$), to zbiór jej punktów nieciągłości jest przeliczalny.

Zadanie 413. Czy istnieje taki zbiór A , że $\mathcal{P}(A) \sim \mathbb{N}$?

Zadanie 414. Niech $A_1 \sim B_1$ i $A_2 \sim B_2$. Czy:

1. $A_1 \times A_2 \sim B_1 \times B_2$,
2. $A_1 \cap A_2 \sim B_1 \cap B_2$,
3. $A_1 \cup A_2 \sim B_1 \cup B_2$?

W punkcie 3. możesz założyć, że zbiory A_1 , A_2 , B_1 i B_2 są przeliczalne (zadanie bez tego założenia jest trudne i wymaga użycia pewnika wyboru). Czy odpowiedzi na powyższe pytania ulegną zmianie, jeśli założymy, że jeden ze zbiorów A_1 lub A_2 jest nieskończony? Czy ulegną one zmianie jeśli założymy, że oba zbiory są nieskończone?

Zadanie 415. Zbiory A i B są przeliczalne oraz zbiór $A \times B$ jest nieskończony. Co można powiedzieć o mocach zbiorów A i B ?

Zadanie 416. Udowodnij, że zbiór wszystkich skończonych ciągów o elementach ze skończonego zbioru A jest przeliczalny.

Zadanie 417. Udowodnij, że zbiór wszystkich skończonych ciągów o elementach z przeliczalnego zbioru A jest przeliczalny.

Zadanie 418. *Wielomianem jednej zmiennej* o współczynnikach wymiernych nazywamy funkcję daną wzorem

$$P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i,$$

gdzie $a_i \in \mathbb{Q}$ dla $i = 0, \dots, n$. Udowodnij, że zbiór wielomianów jednej zmiennej o współczynnikach wymiernych jest przeliczalny.

Zadanie 419. Wykaż, że zbiór słabo rosnących funkcji $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ jest nieprzeliczalny (funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ jest *słabo rosnąca*, jeśli implikacja $x > y \Rightarrow f(x) \geq f(y)$ zachodzi dla wszelkich $x, y \in \mathbb{N}$).

Zadanie 420. Jaka jest moc zbioru nieskończonych ciągów o wyrazach wymiernych?

Zadanie 421. Jaka jest moc zbioru nieskończonych ciągów o wyrazach wymiernych, stałych od pewnego miejsca?

Zadanie 422. Jaka jest moc rodziny skończonych podzbiorów zbioru \mathbb{N} ? Jaka jest moc rodziny nieskończonych podzbiorów zbioru \mathbb{N} ?

Zadanie 423. Ile jest ciągów liczb wymiernych zbieżnych do 1?

Zadanie 424. Ile jest rosnących ciągów liczb wymiernych zbieżnych do 1?

Zadanie 425. Czy zbiór nieskończonych nierosnących ciągów o wyrazach naturalnych jest przeliczalny? (Ciąg $(a_i)_{i \in \mathbb{N}}$ jest nierosnący, jeśli $a_i \geq a_{i+1}$ dla każdego $i \in \mathbb{N}$).

Zadanie 426. Wykaż, że zbiór słabo malejących funkcji $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ jest przeliczalny (funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ jest *słabo malejąca*, jeśli $x > y \Rightarrow f(x) \leq f(y)$ dla wszelkich $x, y \in \mathbb{N}$).

Zadanie 427. Liczba a jest punktem skupienia ciągu $(x_i)_{i=1}^{\infty}$ liczb rzeczywistych, jeśli istnieje podciąg (x_{j_i}) ciągu (x_i) zbieżny do a . Ile ciąg może mieć punktów skupienia?

Zadanie 428. Ile jest bijekcji $f : A \rightarrow A$, gdy zbiór A jest przeliczalny?

Zadanie 429. Liczba rzeczywista x jest *algebraiczna*, jeśli istnieje taki wielomian jednej zmiennej o współczynnikach wymiernych, że x jest jego pierwiastkiem. Udowodnij, że zbiór liczb algebraicznych jest przeliczalny.

Zadanie 430. Niech $P \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ oznacza relację taką, że

$$P(x, y) \Leftrightarrow \exists q \in \mathbb{Q} (x = y + q),$$

gdzie \mathbb{Q} jest zbiorem liczb wymiernych.

- Czy P jest relacją równoważności?
- Jakie są moce klas abstrakcji $[r]_P$ dla liczb $r \in \mathbb{R}$? Jaka jest moc klasy abstrakcji $[\pi]_P$? Jak jest moc klasy abstrakcji $[\frac{23}{7}]_P$? Czy wszystkie klasy abstrakcji mają tę samą moc?
- Czy rodzina klas abstrakcji relacji P jest przeliczalna?

Zadanie 431. Jaka jest moc zbioru wszystkich nieskończonych niemalejących ciągów o wyrazach naturalnych? Jaka jest, dla danego n , moc zbioru wszystkich nieskończonych niemalejących ciągów o wyrazach ze zbioru $\{0, \dots, n-1\}$?

Zadanie 432. Wykaż, że jeśli \sim jest relacją równoważności w zbiorze przeliczalnym A , to zbiór klas równoważności $A/\sim = \{[a]_\sim : a \in A\}$ jest przeliczalny.

Zadanie 433. Wiadomo, że \sim jest relacją równoważności na zbiorze A , zbiór klas równoważności A/\sim jest przeliczalny oraz dla każdego $a \in A$, klasa równoważności $[a]_\sim$ elementu a jest przeliczalna. Wykaż, że zbiór A jest przeliczalny.

Zadanie 434. Czy zbiór relacji równoważności na zbiorze przeliczalnym jest zbiorem przeliczalnym?

Zadanie 435. Dany jest nieskończony przeliczalny zbiór A i liczba $n \in \mathbb{N}$. Ile jest takich relacji równoważności \sim na zbiorze A , że dla każdego $a \in A$ klasa abstrakcji $[a]_\sim$ ma dokładnie n elementów?

Zadanie 436. Ile jest relacji równoważności na przeliczalnym zbiorze A takich, że wszystkie ich klasy abstrakcji są skończone?

Zadanie 437. Niech zbiory $A \cup B$ i $C \cup D$ będą przeliczalne nieskończone. Która z poniższych formuł wynika z tego założenia? Uzasadnij swoje odpowiedzi.

$$\begin{aligned} & A \sim C \vee B \sim D \\ & A \sim C \vee A \sim D \vee B \sim C \vee B \sim D \\ & (A \sim C \wedge B \sim D) \vee (A \sim D \wedge B \sim C) \\ & A \sim C \vee A \sim D \end{aligned}$$

Zadanie 438. Mówimy, że ciąg liczb rzeczywistych $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ *rośnie szybciej* niż ciąg $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$, gdy

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{y_n} = 0.$$

Pokaż, że dla każdego ciągu $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ istnieje ciąg rosnący od niego szybciej. Niech \mathfrak{S} będzie zbiorem ciągów liczb rzeczywistych o tej własności, że dla każdego ciągu liczb rzeczywistych $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ istnieje w zbiorze \mathfrak{S} ciąg $(y_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathfrak{S}$ rosnący od niego szybciej. Wykorzystując metodę przekątniową udowodnij, że \mathfrak{S} nie jest zbiorem przeliczalnym.

Zadanie 439. Udowodnij, że każdy zbiór rozłącznych odcinków na prostej jest przeliczalny. Pokaż, że istnieje nieprzeliczalny zbiór rozłącznych odcinków na płaszczyźnie.

Zadanie 440. Udowodnij, że każdy zbiór rozłącznych kół na płaszczyźnie jest przeliczalny. Pokaż, że istnieje nieprzeliczalny zbiór rozłącznych okręgów na płaszczyźnie. Koło to zbiór punktów $\langle x, y \rangle$ spełniających warunek

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \leq r^2$$

dla pewnego punktu $\langle x_0, y_0 \rangle$ i dodatniej liczby rzeczywistej r , a okrąg to zbiór punktów $\langle x, y \rangle$ spełniających warunek

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2.$$

Zadanie 441. Ósemka to dwa zewnętrznie styczne okręgi. Udowodnij, że każdy zbiór rozłącznych ósemek na płaszczyźnie jest przeliczalny. Czy można ułożyć na płaszczyźnie więcej niż przeliczalnie wiele rozłącznych okręgów?

Zadanie 442. T-kształt to figura na płaszczyźnie, złożona z pary prostopadłych odcinków o niezerowej długości, z których jeden końcem styka się z drugim w miejscu różnym od końca tego drugiego (dlatego ta figura przypomina literę T). Krzyż, to figura złożona z pary nierównoległych, przecinających się odcinków niezerowej długości, które nie mają wspólnych końców. Jak wiele rozłącznych T-kształtów można ułożyć na płaszczyźnie? Jak wiele krzyży można ułożyć na płaszczyźnie?

Zadanie 443. Parasol to bryła złożona z koła o niezerowej średnicy i prostopadłego do niego odcinka o niezerowej długości, który styka się swym końcem ze środkiem koła. Pokaż, że każdy zbiór rozłącznych parasoli w przestrzeni trójwymiarowej jest co najwyżej przeliczalny.

Zadanie 444. Ile jest wszystkich funkcji $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$? A ile jest funkcji $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ których wartość możemy obliczać przy pomocy komputera (tj. takich, dla których istnieje program komputerowy, który wczytuje liczbę naturalną n i wypisuje liczbę $f(n)$ dla dowolnego $n \in \mathbb{N}$)?

8.7. Paradoks niedźwiedzi

Na korytarzu Instytutu Informatyki można czasem usłyszeć o następującym paradoksie, opisanym w trzech kolejnych zadaniach.

Zadanie 445. Myśliwy spotyka w lesie dwa niedźwiedzie i mówi im tak: *Za chwilę założę wam na głowy po jednym kapeluszu. Każdy z nich może być biały lub czarny. Każdy z was będzie widział kapelusz kolegi, ale nie będzie widział własnego. Nie będziecie się mogli w żaden sposób komunikować, a po chwili będziecie musieli jednocześnie powiedzieć jaki każdy z was ma kapelusz na swojej głowie. Jeśli co najmniej jeden z was zgadnie, puszcze was wolno. Ale jeśli obaj się pomylicie, zrobię z was*

bigos. Teraz możecie się przez chwilę naradzić. Czy niedźwiedzie mogą się uratować postępując zgodnie z protokołem narzuconym przez myśliwego? Oczywiście 25-procentowa szansa wylądowania w bigosie jest nie do zaakceptowania.

Zadanie 446. Sytuacja taka jak w poprzednim zadaniu, ale niedźwiedzi jest nieskończenie (przeliczalnie) wiele. Pomylić się może skończenie wiele niedźwiedzi, prawie wszystkie muszą poprawnie odgadnąć.

Zadanie 447. Sytuacja taka jak w poprzednim zadaniu, ale kolorów kapeluszy jest nieskończenie (przeliczalnie) wiele. Pomylić się może skończenie wiele niedźwiedzi, prawie wszystkie muszą poprawnie odgadnąć.

Powyższe zadania mają proste i bardzo zaskakujące rozwiązania, choć rozwiązania dwóch ostatnich zadań wymagają wykorzystania aksjomatu wyboru, są więc niekonstrukttywne. Dodatkowo zakładamy w nich, że każdy niedźwiedź może zapamiętać continuum nieskończonych ciągów, co wydaje się nawet bardziej kontrowersyjne od założenia, że w jednym lesie można spotkać nieskończenie wiele niedźwiedzi swobodnie posługujących się zasadą abstrakcji i aksjomatem wyboru.

9

Relacje porządku

Definicja 130. *Częściowym porządkiem w zbiorze A nazywamy relację \leq (będącą podzbiorem A^2), która jest zwrotna, słabo antysymetryczna i przechodnia, tzn. prawdziwe są formuły*

- $\forall a \in A (a \leq a)$,
- $\forall a, b \in A (a \leq b \wedge b \leq a \Rightarrow a = b)$,
- $\forall a, b, c \in A (a \leq b \wedge b \leq c \Rightarrow a \leq c)$.

Definicja 131. Jeśli \leq jest częściowym porządkiem na A , to $a < b$ oznacza

$$a \leq b \wedge a \neq b.$$

Definicja 132. *Zbiór częściowo uporządkowany, to zbiór A z relacją częściowego porządku \leq . Zbiór częściowo uporządkowany oznaczamy $\langle A, \leq \rangle$.*

Przykład 133. Oto przykłady zbiorów uporządkowanych:

1. $\langle \mathcal{P}(A), \subseteq \rangle$ (rodzina podzbiorów zbioru A z relacją inkluzji);
2. $\langle \mathbb{N}, \leq \rangle$ (zbiór liczb naturalnych ze zwykłym porządkiem);
3. $\langle \mathcal{B}, \subseteq \rangle$, gdzie $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{P}(A)$;
4. $\langle \mathbb{N}, | \rangle$, gdzie $a|b \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \exists x (ax = b)$.

Definicja 134. Porządek częściowy \leq w zbiorze A jest *liniowy*, jeśli

$$\text{dla dowolnych } a, b \in A \text{ zachodzi } a \leq b \text{ lub } b \leq a.$$

Przykład 135. Porządkiem liniowym jest relacja \leq na zbiorze liczb rzeczywistych. Relacja inkluzji \subseteq na zbiorze $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ nie jest porządkiem liniowym.

Definicja 136. Łańcuchem w zbiorze uporządkowanym $\langle A, \leq \rangle$ nazywamy taki podzbiór L zbioru A , że dla wszystkich $a, b \in L$ zachodzi $a \leq b$ lub $b \leq a$. Antylańcuchem w $\langle A, \leq \rangle$ nazywamy taki podzbiór L zbioru A , że dla wszystkich $a, b \in L$ jeśli zachodzi $a \leq b$ lub $b \leq a$, to $a = b$.

Innymi słowy, łańcuch to dowolny liniowo uporządkowany podzbiór A , natomiast antylańcuch to dowolny podzbiór składający się z elementów wzajemnie nieporównywalnych.

9.1. Przykłady porządków

Zadanie 448. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą porządkami liniowymi. Relację \leq na $A \times B$ określamy wzorem

$$\langle a_1, b_1 \rangle \leq \langle a_2, b_2 \rangle \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} a_1 \leq_A a_2 \wedge b_1 \leq_B b_2$$

Wykaż, że: a) \leq jest porządkiem częściowym na $A \times B$, b) \leq jest porządkiem liniowym wtedy i tylko wtedy, gdy zbiór A lub zbiór B jest co najwyżej jednoelementowy.

Zadanie 449. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą niepustymi zbiorami uporządkowanymi. Relację \leq_{lex} na $A \times B$ określamy wzorem

$$\langle a_1, b_1 \rangle \leq_{\text{lex}} \langle a_2, b_2 \rangle \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} a_1 <_A a_2 \vee (a_1 = a_2 \wedge b_1 \leq_B b_2)$$

Wykaż, że: a) \leq_{lex} jest porządkiem częściowym na $A \times B$, b) \leq_{lex} jest liniowy wtedy i tylko wtedy, gdy \leq_A i \leq_B są liniowe.

Zadanie 450. Niech A będzie zbiorem niepustym oraz niech $\langle B, \leq_B \rangle$ będzie porządkiem częściowym. Na zbiorze funkcji B^A określamy relację \leq przyjmując, że dla $f, g \in B^A$ jest $f \leq g$, wtedy i tylko wtedy, gdy $f(a) \leq_B g(a)$ dla każdego $a \in A$. Wykaż, że $\langle B^A, \leq \rangle$ jest porządkiem częściowym.

Zadanie 451. Podaj przykład przeliczalnego zbioru uporządkowanego, zawierającego zarówno nieskończony łańcuch jak i nieskończony antylańcuch.

Zadanie 452. Pokaż, że na zbiorze liczb zespolonych \mathbb{C} nie można wprowadzić takiego porządku \leq , że jednocześnie:

- zero jest porównywalne z każdą liczbą zespoloną, tj. $z = 0$ lub $z > 0$ lub $z < 0$ dla każdej liczby $z \in \mathbb{C}$;
- porządek \leq jest zgodny z działaniami arytmetycznymi, dokładniej $-z < 0$ i $wz > 0$ dla dowolnych $w, z > 0$ oraz $-z > 0$ dla dowolnego $z < 0$.

Zadanie 453. Czy dla danego zbioru $X \neq \emptyset$ można tak określić relację R , by równocześnie:

1. zbiór $\langle X, R \rangle$ był zbiorem częściowo uporządkowanym,
2. R była relacją równoważności w X ?

Zadanie 454. Czy dla danego takiego zbioru X , że $|X| \geq 2$ można określić taką relację R , by równocześnie:

1. zbiór $\langle X, R \rangle$ był zbiorem liniowo uporządkowanym,
2. R była relacją równoważności w X ?

Zadanie 455. Podaj przykład porządku liniowego na zbiorze $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$.

Zadanie 456. Podaj przykład porządku liniowego na zbiorze $\mathcal{P}(\mathbb{N})$.

Zadanie 457. Podaj przykład siedmiu różnych porządków liniowych na zbiorze \mathbb{N} .

Zadanie 458. Na zbiorze $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ określamy relacje:

1. $f R_1 g$ jeśli $|\{n \in \mathbb{N} \mid f(n) \neq g(n)\}| < \infty$,
2. $f R_2 g$ jeśli $|\{n \in \mathbb{N} \mid f(n) \neq g(n)\}| < 5$,
3. $f R_3 g$ jeśli $|\{n \in \mathbb{N} \mid f(n) < g(n)\}| < \infty$,
4. $f R_4 g$ jeśli $|\{n \in \mathbb{N} \mid f(n) < g(n)\}| < 5$,
5. $f R_5 g$ jeśli $f(n) \leq g(n)$ dla każdego $n \in \mathbb{N}$.

Które z nich są relacjami a) równoważności, b) częściowego porządku, c) liniowego porządku?

Definicja 137. Niech A będzie dowolnym zbiorem. Będziemy nazywać go *alfabetem* a jego elementy *literami*. Słowem nad alfabetem A nazywamy dowolny skończony ciąg liter ze zbioru A . Słowo puste (ciąg długości zero) oznaczamy ϵ . Przez A^* oznaczamy zbiór wszystkich słów nad alfabetem A . Jeżeli $u = u_1 u_2 \dots u_n$ i $w = w_1 w_2 \dots w_m$, to uw oznacza *złożenie (konkatenację)* słów u i w , tj. słowo $u_1 u_2 \dots u_n w_1 w_2 \dots w_m$. Słowo u jest *przedrostkiem (prefiksem)* słowa w , jeśli istnieje takie słowo v , że $uv = w$. Podobnie, słowo u jest *przyrostkiem (sufiksem)* słowa w , jeśli istnieje takie słowo v , że $vu = w$. Dla słowa w przez $|w|$ będziemy oznaczać jego długość a dla $0 < j \leq |w|$ przez $w(j)$ jego j -tą literę.

Fakt 138. Niech A będzie dowolnym zbiorem i niech $u \leq w$ oznacza, że u jest przedrostkiem w . Wtedy $\langle A^*, \leq \rangle$ jest zbiorem częściowo uporządkowanym.

Definicja 139. Niech $\langle A, \leq \rangle$ będzie zbiorem częściowo uporządkowanym. Na zbiorze A^* skończonych ciągów elementów zbioru A określamy relację \leq_{lex} przyjmując, że dla dowolnych $u, w \in A^*$ zachodzi $u \leq_{lex} w$ wtedy i tylko wtedy, gdy u jest przedrostkiem w lub istnieje $i \leq \min(|u|, |w|)$ takie, że dla $j < i$ zachodzi $u(j) = w(j)$ oraz $u(i) < w(i)$. Relację \leq_{lex} nazywamy *porządkiem leksykograficznym* na A^* generowanym przez porządek \leq .

Zadanie 459. Wykaż, że relacja \leq_{lex} jest porządkiem częściowym.

Zadanie 460. Wykaż, że jeśli $\langle A, \leq \rangle$ jest porządkiem liniowym, to $\langle A^*, \leq_{lex} \rangle$ też jest porządkiem liniowym (udowodnij tylko liniowość). Czy zachodzi implikacja w drugą stronę?

Zadanie 461. Rozważmy system komputerowy dla wypożyczalni, w którym można robić rezerwacje (lub jakkolwiek inny system umożliwiający rezerwację czegokolwiek — np sali, rzutnika czy pokoju w hotelu). System taki musi umieć sprawdzać, czy dwie rezerwacje tego samego obiektu ze sobą kolidują. Napisz w języku ANSI C (lub podobnym języku programowania) warunek boolowski¹ sprawdzający, czy rezerwacja od dnia d_1 miesiąca m_1 do dnia d_2 miesiąca m_2 koliduje z rezerwacją od dnia d_3 miesiąca m_3 do dnia d_4 miesiąca m_4 . Zakładamy przy tym, że wszystkie daty są w tym samym roku.

Zadanie 462. Przedziałem domkniętym od a do b w zbiorze liniowo uporządkowanym $\langle P, \sqsubseteq \rangle$ nazywamy zbiór $O[a, b] = \{x \in P \mid a \sqsubseteq x \wedge x \sqsubseteq b\}$.

- Używając jedynie symboli $a, b, c, d, \leq, <, \geq, >$, spójników logicznych i nawiasów napisz formułę logiki pierwszego rzędu, która interpretowana w zbiorze liniowo uporządkowanym $\langle P, \sqsubseteq \rangle$ mówi, że przedziały domknięte $O[a, b]$ i $O[c, d]$ nie są rozłączne.
- Używając jedynie symboli $d_1, m_1, d_2, m_2, d_3, m_3, d_4, m_4, \leq, <, \geq, >, =$ oraz spójników logicznych i nawiasów napisz formułę logiki pierwszego rzędu, która interpretowana w zbiorze liczb rzeczywistych z naturalnym porządkiem mówi, że w zbiorze $(\mathbb{R} \times \mathbb{R}, \leq_{lex})$ przedziały domknięte $O[\langle m_1, d_1 \rangle, \langle m_2, d_2 \rangle]$ oraz $O[\langle m_3, d_3 \rangle, \langle m_4, d_4 \rangle]$ nie są rozłączne. Oczywiście \leq_{lex} jest tutaj leksykograficznym rozszerzeniem naturalnego porządku w zbiorze liczb rzeczywistych.

Zadanie 463. Napisz w języku ANSI C (lub podobnym języku programowania) funkcję boolowską wykrywającą kolizje w rezerwacjach od godziny g_1 dnia d_1 miesiąca m_1 roku r_1 do godziny g_2 dnia d_2 miesiąca m_2 roku r_2 i od godziny g_3 dnia d_3 miesiąca m_3 roku r_3 do godziny g_4 dnia d_4 miesiąca m_4 roku r_4 .

¹warunek boolowski, czyli coś, co zadziała po wstawieniu w miejsce kropek w instrukcji `if (...) printf("mamy problem");`. W szczególności nie wolno w tym miejscu deklarować nowych zmiennych ani funkcji.

Zadanie 464. Kandydaci do objęcia pewnego stanowiska oceniani są w $k \in \mathbb{N}$ różnych kategoriach. W każdej z tych kategorii otrzymują ocenę będącą liczbą naturalną nie mniejszą niż 1 i nie większą niż 6. Kandydat k_1 uważany jest za lepszego niż k_2 (co zapisujemy jako $k_1 L k_2$) jeśli k_1 ma wyższe oceny niż k_2 we wszystkich kategoriach oprócz co najwyżej dwóch. Niech R będzie najmniejszą zwrotną relacją taką, że $RR \subseteq R$ i $L \subseteq R$. Czy R jest częściowym porządkiem, jeśli:

- a) $k = 12$,
- b) $k = 13$?

Zadanie 465. Niech R będzie relacją zwrotną i przechodnią. Łańcuchem względem R nazywamy ciąg $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$ taki, że $\langle a_i, a_{i+1} \rangle \in R$ dla $i \in \{1, \dots, n-1\}$ oraz $a_i \neq a_j$ dla $i \neq j$. Łańcuch $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$ jest cyklem względem R , jeśli $n > 1$ i $\langle a_n, a_1 \rangle \in R$. Udowodnij, że jeśli nie istnieje cykl względem R , to R jest porządkiem częściowym.

Definicja 140. Porządek \leq na zbiorze A jest gęsty, gdy dla dowolnych takich $a, b \in A$, że $a < b$, istnieje taki $c \in A$, że $a < c < b$.

Zadanie 466. Niech symbol \leq oznacza liniowy porządek w niepustym, skończonym zbiorze A . Udowodnij, że porządek \leq jest gęsty wtedy i tylko wtedy, gdy zbiór A jest jednoelementowy.

Zadanie 467. Wielomianem jednej zmiennej nad zbiorem liczb rzeczywistych \mathbb{R} nazywamy funkcję daną wzorem

$$P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i,$$

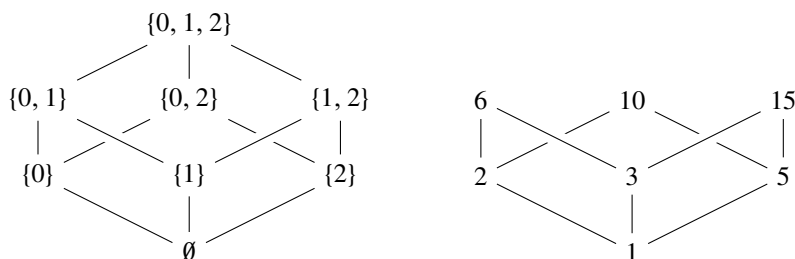
gdzie $a_i \in \mathbb{R}$ dla $i = 0, \dots, n$. Niech $\mathbb{R}[x]$ oznacza zbiór wielomianów jednej zmiennej nad \mathbb{R} . a) Wyznacz moc zbioru $\mathbb{R}[x]$. Na zbiorze $\mathbb{R}[x]$ definiujemy relację \preceq w następujący sposób:

$$P \preceq Q \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \exists x \in \mathbb{R} \forall y \in \mathbb{R} (x \leq y \Rightarrow P(y) \leq Q(y)),$$

dla $P, Q \in \mathbb{R}[x]$. Udowodnij, że relacja \preceq jest porządkiem na $\mathbb{R}[x]$. Czy jest to porządek a) liniowy, b) gęsty?

Definicja 141. Niech $\langle X, \leq \rangle$ będzie zbiorem częściowo uporządkowanym. Następnikiem $x \in X$ nazywamy taki element $y \in X$, że $x < y$ oraz w zbiorze X nie istnieje taki element z , że $x < z$ i $z < y$. Podobnie poprzednikiem $x \in X$ nazywamy taki element $y \in X$, że $y < x$ oraz w zbiorze X nie istnieje taki element z , że $y < z$ i $z < x$.

Wygodnym sposobem przedstawiania graficznego niektórych (nie wszystkich!) porządków są tzw. *diagramy Hassego*. Diagram Hassego dla zbioru uporządkowanego $\langle P, \leq \rangle$ to graf o wierzchołkach w zbiorze P i krawędziach łączących poprzedniki z ich następnikami w porządku \leq . Przy czym zwyczajowo nie rysuje się strzałek na krawędziach, a zamiast tego poprzedniki rysuje się poniżej następników. Rysunek 12 przedstawia po lewej stronie diagram Hassego dla zbioru potęgowego $\mathcal{P}(\{0, 1, 2\})$ uporządkowanego relacją inkluzji \subseteq oraz dla po prawej stronie diagram Hassego dla zbioru $\{1, 2, 3, 5, 6, 10, 15\}$ uporządkowanego relacją podzielności $|$.



Rysunek 12: Diagramy Hassego porządków $\langle \mathcal{P}(\{0, 1, 2\}), \subseteq \rangle$ (po lewej) oraz $\langle \{1, 2, 3, 5, 6, 10, 15\}, | \rangle$ (po prawej stronie).

9.2. Elementy wyróżnione

Definicja 142. Niech $\langle P, \leq \rangle$ będzie porządkiem częściowym i niech $X \subseteq P$. Element $x \in X$ jest *elementem największym* (odpowiednio *najmniejszym*) w X , jeśli dla każdego $y \in X$ zachodzi $y \leq x$ (odpowiednio $x \leq y$).

W literaturze często element najmniejszy oznacza się \perp , zaś największy \top .

Definicja 143. Element $x \in X$ jest elementem *maksymalnym* (odpowiednio *minimalnym*) w X , jeśli dla każdego $y \in X$ z warunku $x \leq y$ (odpowiednio $y \leq x$) wynika $x = y$.

Elementy minimalne, maksymalne, najmniejsze i największe w zbiorze uporządkowanym, podobnie jak zdefiniowane w rozdziale 10 kresy, nazywamy *elementami wyróżnionymi*.

Definicja 144. Niech $\langle P, \leq \rangle$ będzie zbiorem częściowo uporządkowanym. Porządek $\langle P, \leq^{-1} \rangle$ nazywamy porządkiem *dualnym* do $\langle P, \leq \rangle$. Jeśli dane jest pojęcie \mathcal{Q} dotyczące porządków, to pojęcie \mathcal{Q}^{-1} dualne do niego otrzymujemy przez zastąpienie w definicji \mathcal{Q} symbolu \leq przez symbol \leq^{-1} . Zauważmy, że pojęcia minimalny i maksymalny oraz najmniejszy i największy są dualne.

Twierdzenie 145. Niech $\langle P, \leq \rangle$ będzie częściowym porządkiem i niech $X \subseteq P$. Wtedy element największy w X jest elementem maksymalnym w X .

Twierdzenie 146. Niech $\langle P, \leq \rangle$ będzie zbiorem uporządkowanym. Dla dowolnego zbioru $X \subseteq P$ istnieje co najwyżej jeden element największy tego zbioru.

Zatem każdy zbiór posiada też co najwyżej jeden element najmniejszy. Elementów maksymalnych i minimalnych może być natomiast wiele.

Przykład 147. Niech X będzie zbiorem niepustym i niech $P = \mathcal{P}(X) \setminus \{\emptyset\}$. Wtedy w zbiorze uporządkowanym $\langle P, \subseteq \rangle$ jest $|X|$ elementów minimalnych.

Zadanie 468. Rozważmy relację $|$ na zbiorze $\mathbb{N} \setminus \{0\}$.

1. Znajdź zbiór elementów minimalnych w zbiorze $\langle \mathbb{N} \setminus \{0\}, | \rangle$.
2. Udowodnij, że w zbiorze $\langle \mathbb{N} \setminus \{0\}, | \rangle$ nie ma elementów maksymalnych.

Zadanie 469.

1. Znajdź ogólną postać łańcucha w zbiorze $\langle \mathbb{N} \setminus \{0\}, | \rangle$,
2. Udowodnij, że relacja inkluzji w zbiorze łańcuchów zbioru $\langle \mathbb{N} \setminus \{0\}, | \rangle$ jest częściowym porządkiem. Znajdź postać łańcuchów minimalnych i maksymalnych względem relacji inkluzji.

Zadanie 470. Znajdź przykład zbioru częściowo uporządkowanego $\langle X, R \rangle$ takiego, że w zbiorze $\langle X, R \rangle$ jest dokładnie jeden element maksymalny i nie ma elementu największego. Znajdź przykład zbioru częściowo uporządkowanego $\langle X, R \rangle$, takiego, że w zbiorze $\langle X, R \rangle$ jest dokładnie jeden element minimalny i nie ma elementu najmniejszego.

Zadanie 471. Znajdź elementy minimalne, maksymalne, największy i najmniejszy w zbiorze $\langle \mathbb{N}^{\mathbb{N}}, R \rangle$ z zadania 480.

9.3. Izomorfizm porządkowy

Definicja 148. Zbiory uporządkowane $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ są *izomorficzne*, jeżeli istnieje bijekcja $\phi : A \rightarrow B$ zachowująca porządek, tzn. taka, że $\phi(a_1) \leq_B \phi(a_2)$ wtedy i tylko wtedy, gdy $a_1 \leq_A a_2$, dla wszelkich $a_1, a_2 \in A$. Funkcję ϕ nazywamy wtedy *izomorfizmem* zbiorów uporządkowanych $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$.

Definicja 149. Niech $\langle P, \leq_P \rangle$ oraz $\langle Q, \leq_Q \rangle$ będą zbiorami częściowo uporządkowanymi. Funkcja $f : P \rightarrow Q$ jest *monotoniczna*, jeśli

$$\text{dla dowolnych } x, y \in P, \text{ jeśli } x \leq_P y, \text{ to } f(x) \leq_Q f(y).$$

Fakt 150. Funkcja ϕ jest izomorfizmem porządkowym, jeśli jest bijekcją oraz ϕ i ϕ^{-1} są monotoniczne.

Twierdzenie poniżej mówi, że izomorfizmy porządkowe zachowują elementy wyróżnione (na razie jeszcze bez kresów, por. zadanie 502).

Twierdzenie 151. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą zbiorami uporządkowanymi, $\phi : A \rightarrow B$ izomorfizmem porządkowym i niech $X \subseteq A$. Wtedy a jest elementem najmniejszym (odpowiednio, minimalnym, największym, maksymalnym) w X wtedy i tylko wtedy, gdy $\phi(a)$ jest elementem najmniejszym (odpowiednio, minimalnym, największym, maksymalnym) w $\phi[X]$.

W poniższych zadaniach \mathbb{Q} oznacza zbiór liczb wymiernych, \mathbb{R} — zbiór liczb rzeczywistych, (a, b) — przedział otwarty o końcach a i b , $[a, b]$ zaś — przedział domknięty.

Zadanie 472. Udowodnij, że funkcja $f : \mathbb{R} \rightarrow (-1, 1)$ (gdzie oba zbiory są uporządkowane zwykłą relacją porządku) dana wzorem $f(x) = \frac{x}{1+|x|}$ jest izomorfizmem porządkowym.

Zadanie 473. Udowodnij, że zbiory \mathbb{Q} , $\mathbb{Q} \cap (0, 1)$ i $\mathbb{Q} \setminus [0, 1)$ uporządkowane zwykłą relacją porządku są izomorficzne.

Zadanie 474. Udowodnij, że zbiory \mathbb{Q} , $\mathbb{Q} \setminus \{0\}$ i $\mathbb{Q} \setminus [0, 1]$ uporządkowane zwykłą relacją porządku są izomorficzne.

Definicja 152. Porządek \leq na zbiorze A jest:

- *gęsty*, jeśli pomiędzy każdą parą elementów zbioru A znajduje się trzeci element, tj. gdy dla dowolnych takich $a, b \in A$, że $a < b$, istnieje taki $c \in A$, że $a < c < b$;
- *bez końców*, jeśli dla dowolnego elementu zbioru A istnieje element od niego większy i element od niego mniejszy, tj. gdy dla każdego $a \in A$ istnieją takie $b, c \in A$, że $b < a < c$.

Dla przykładu zwykły porządek na wszystkich pięciu zbiorach z zadań 473 i 474 jest gęsty i bez końców. Zbiory te są izomorficzne nie przez przypadek, o czym przekonasz się rozwiązując kolejne zadanie. Zauważ ponadto, że zwykły porządek na zbiorze $\mathbb{Q} \setminus (0, 1)$ nie jest gęsty, a na zbiorze $\mathbb{Q} \cap [0, 1]$ nie jest bez końców.

Zadanie 475. Pokaż, że dowolne dwa zbiory przeliczalne uporządkowane liniowymi, gęstymi relacjami porządku bez końców są izomorficzne.

Zadanie 476. Uzasadnij, że twierdzenie z poprzedniego zadania jest fałszywe dla zbiorów nieprzeliczalnych, tj. podaj przykład dwóch nieprzeliczalnych zbiorów tej samej mocy, uporządkowanych liniowymi, gęstymi relacjami porządku bez końców, które nie są izomorficzne.

Zadanie 477. Pokaż, że zbiory: liczb naturalnych ze zwykłym porządkiem i skończonych ciągów liczb naturalnych z porządkiem leksykograficznym generowanym przez zwykły porządek na liczbach naturalnych *nie są* izomorficzne.

Zadanie 478. Udowodnij, że zbiory uporządkowane $\langle \mathbb{R}, \leq \rangle$ i $\langle \mathbb{R} \times \mathbb{R}, \leq_{lex} \rangle$ nie są izomorficzne.

Zadanie 479. Pokaż, że zbiory liczb rzeczywistych ze zwykłym porządkiem i skończonych ciągów liczb rzeczywistych z porządkiem leksykograficznym generowanym przez zwykły porządek na liczbach rzeczywistych *nie są* izomorficzne.

Zadanie 480. W zbiorze $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ wprowadzamy relację R wzorem

$$\bar{a} R \bar{b} \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \forall n (a_n \leq b_n),$$

dla $\bar{a} = (a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ i $\bar{b} = (b_k)_{k \in \mathbb{N}}$. Udowodnij, że zbiór $\langle \mathbb{N}^{\mathbb{N}}, R \rangle$ jest częściowo uporządkowany. Czy R jest liniowym porządkiem? Czy jest gęstym porządkiem? Czy ten porządek jest izomorficzny z $\langle \mathbb{R}, \leq \rangle$?

Zadanie 481. W zbiorze \mathbb{C} liczb zespolonych wprowadzamy porządek

$$x R y \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} \operatorname{Re} x < \operatorname{Re} y \vee (\operatorname{Re} x = \operatorname{Re} y \wedge \operatorname{Im} x \leq \operatorname{Im} y).$$

Udowodnij, że R jest liniowym gęstym porządkiem bez końców. Czy $\langle \mathbb{C}, R \rangle$ jest izomorficzny z $\langle \mathbb{R}, \leq \rangle$?

Zadanie 482. Udowodnij, że każdy taki niepusty zbiór liniowo uporządkowany $\langle X, \preceq \rangle$, że każdy jego element posiada poprzednik i następnik, oraz że jeśli $x \preceq y$, to zbiór $\{z \mid x \preceq z \wedge z \preceq y\}$ jest skończony, jest izomorficzny ze zbiorem $\langle \mathbb{Z}, \leq \rangle$ liczb całkowitych uporządkowanym standardową relacją mniejszości \leq .

Zadanie 483. Podaj przykład przeliczalnego liniowego porządku takiego, że każdy element posiada następnik, istnieje element najmniejszy, każdy element prócz najmniejszego posiada poprzednik, ale nie izomorficznego z $\langle \mathbb{N}, \leq \rangle$.

Zadanie 484. W zbiorze \mathbb{R}/\sim , gdzie \sim jest relacją z zadania 319, definiujemy taką relację \preceq , że

$$[x]_{\sim} \preceq [y]_{\sim} \stackrel{\text{df}}{\Leftrightarrow} x \sim y \vee x < y,$$

gdzie \leq jest standardowym porządkiem na liczbach rzeczywistych. Uzasadnij, że definicja \preceq jest poprawna. Udowodnij, że $\langle \mathbb{R}/\sim, \preceq \rangle$ jest zbiorem liniowo uporządkowanym. Pokaż, że $\langle \mathbb{R}/\sim, \preceq \rangle$ i $\langle \mathbb{Z}, \leq \rangle$ są izomorficzne porządkowo, gdzie $\langle \mathbb{Z}, \leq \rangle$ jest zbiorem liczb całkowitych ze standardowym porządkiem.

Zadanie 485. Udowodnij, że zbiory uporządkowane $\langle \mathbb{N} \times \mathbb{Q}, \leq_{lex} \rangle$ i $\langle \mathbb{Q} \times \mathbb{N}, \leq_{lex} \rangle$ nie są izomorficzne.

Zadanie 486. Udowodnij, że zbiory uporządkowane $\langle \mathbb{R}, \leq \rangle$ i $\langle \mathbb{Z} \times [0, 1), \leq_{lex} \rangle$ są izomorficzne.

Zadanie 487. Udowodnij, że zbiory uporządkowane $\langle \mathbb{N} \times \{0, 1\}, \leq_{lex} \rangle$ i $\langle \mathbb{N}, \leq \rangle$ są izomorficzne, oraz że $\langle \mathbb{N} \times \{0, 1\}, \leq_{lex} \rangle$ i $\langle \{0, 1\} \times \mathbb{N}, \leq_{lex} \rangle$ nie są izomorficzne.

9.4. Zawieranie zbiorów jako relacja porządku

Zadanie 488. Udowodnij, że częściowe porządki $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N}), \subseteq \rangle$ oraz $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N}), \supseteq \rangle$ są izomorficzne.

Definicja 153. Rodzina zbiorów $\{A_t\}_{t \in T}$ jest *prawie rozłączna*, jeśli dla wszelkich różnych $s, t \in T$ zbiór $A_t \cap A_s$ jest skończony.

Zadanie 489 (Sierpiński). Pokaż, że w $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ istnieje rodzina mocy continuum zbiorów prawie rozłącznych.

Zadanie 490. Pokaż, że w $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N}), \subseteq \rangle$ istnieje antyłańcuch mocy continuum.

Zadanie 491. Pokaż, że w $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N}), \subseteq \rangle$ istnieje łańcuch mocy continuum.

Definicja 154. Dla danego zbioru X , filtrem w zbiorze $\mathcal{P}(X)$ nazywamy taki zbiór $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(X)$, że jeśli $A \in \mathcal{F}$ i $A \subseteq B \subseteq X$, to również $B \in \mathcal{F}$, oraz jeśli $A, B \in \mathcal{F}$, to również $A \cap B \in \mathcal{F}$.

Zadanie 492. Udowodnij, że jeśli $A \subseteq X$ to $\{B \subseteq X \mid A \subseteq B\}$ jest filtrem. Nazywamy go *filtrem głównym wyznaczonym przez A* .

Zadanie 493. Pokaż, że jeśli X jest zbiorem skończonym, to każdy filtr na $\mathcal{P}(X)$ jest główny.

Zadanie 494. Pokaż, że jeśli X jest zbiorem nieskończonym, to istnieje filtr na $\mathcal{P}(X)$, który nie jest główny.

Zadanie 495. Niech \mathcal{F} będzie filtrem na $\mathcal{P}(\mathbb{N})$. Dla ciągów o wyrazach naturalnych określamy relację R jak następuje: $\bar{a}R\bar{b}$ wtedy i tylko wtedy, gdy $\{n \mid a_n = b_n\} \in \mathcal{F}$. Udowodnij, że R jest relacją równoważności.

9.5. Liczba relacji porządku

Zadanie 496. Ile jest relacji częściowego porządku w zbiorze n -elementowym?

Zadanie 497. Ile jest relacji porządku liniowego w zbiorze n elementowym?

Zadanie 498. Niech \preceq oznacza porządek częściowy na liczbach naturalnych. Mówimy, że \preceq jest *zgodny* ze zwykłym porządkiem, gdy

$$\forall n_1, n_2 \in \mathbb{N} \quad (n_1 \preceq n_2 \Rightarrow n_1 \leq n_2).$$

Ile jest porządków częściowych $\preceq \subseteq \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ zgodnych ze zwykłym porządkiem i takich, że

1. w każdym antyłańcuchu są co najwyżej dwa elementy?
2. co najwyżej skończona liczba elementów należy do jakiegoś łańcucha o liczbie elementów większej niż 1?
3. zbiór

$$\{x \mid \exists y (x \neq y \wedge (y \preceq x \vee x \preceq y))\}$$

jest skończony?

4. w zbiorze $\langle \mathbb{N}, \preceq \rangle$ istnieje element największy?
5. w każdym łańcuchu są co najwyżej dwa elementy?

10

Kresy zbiorów

Definicja 155. Niech $\langle P, \leq \rangle$ będzie częściowym porządkiem i niech $X \subseteq P$. Element $a \in P$ jest *ograniczeniem górnym* zbioru X , jeśli dla każdego $x \in X$ zachodzi $x \leq a$. *Kresem górnym* zbioru X nazywamy najmniejszy element zbioru $\{a \mid a \text{ jest ograniczeniem górnym } X\}$. Kres górny zbioru X oznaczamy $\bigvee X$ lub $\sup X$. Dualnie można zdefiniować pojęcia *ograniczenia dolnego* i *kresu dolnego* (kres dolny zbioru X oznaczamy $\bigwedge X$ lub $\inf X$).

Zadanie 499. Rodzinę $\mathcal{P}(A)$ podzbiorów niepustego zbioru A porządkujemy relacją inkluzji \subseteq . Wykaż, że kres górny dowolnego podzbioru $\mathcal{X} \subseteq \mathcal{P}(A)$ jest równy sumie teoriomnogościowej zbiorów do niego należących, a kres dolny — przekroju. Formalnie: $\sup\{X_s\}_{s \in S} = \bigcup_{s \in S} X_s$ oraz $\inf\{X_s\}_{s \in S} = \bigcap_{s \in S} X_s$ dla dowolnej rodziny $\{X_s\}_{s \in S} \subseteq \mathcal{P}(A)$.

Definicja 156. Relacja podzielności liczb naturalnych $\mid \subset \mathbb{N}^2$ jest określona następująco:

$$x \mid y \stackrel{\text{df}}{\iff} \exists z \in \mathbb{N} (xz = y).$$

Zadanie 500. Pokaż, że relacja \mid jest porządkiem częściowym. Udowodnij, że każdy niepusty podzbiór $\langle \mathbb{N}, \mid \rangle$ posiada kres dolny. Pokaż też, że $\inf\{m, n\} = \gcd(m, n)$ i $\sup\{m, n\} = \text{lcm}(m, n)$, gdzie \gcd jest największym wspólnym dzielnikiem dwu liczb, a lcm — najmniejszą wspólną wielokrotnością.

Zadanie 501. Czy w $\langle \mathbb{N}, \mid \rangle$ istnieje element a) najmniejszy, b) największy?

Zadanie 502. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą zbiorami uporządkowanymi, $\phi : A \rightarrow B$ izomorfizmem porządkowym i niech $X \subseteq A$. Udowodnij, że a jest kresem górnym (odpowiednio, dolnym) zbioru X wtedy i tylko wtedy, gdy $\phi(a)$ jest kresem górnym (odpowiednio, dolnym) zbioru $\phi(X)$.

Definicja 157. Funkcje $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ i $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ są *równe prawie wszędzie*, jeśli zbiór

$$\{n \in \mathbb{N} \mid f(n) \neq g(n)\}$$

jest skończony. Zapis $f \approx g$ oznacza, że funkcje f i g są równe prawie wszędzie.

Zadanie 503. Pokaż, że \approx jest relacją równoważności.

Zadanie 504. Ile jest klas abstrakcji relacji \approx ? Jaka jest moc każdej z nich?

Definicja 158. Funkcja $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ *majoryzuje* funkcję $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, jeśli zbiór

$$\{n \in \mathbb{N} \mid f(n) < g(n)\}$$

jest skończony. Zapis $g \preceq f$ oznacza, że funkcja f majoryzuje funkcję g .

Na zbiorze $\mathcal{F} = \{[f]_{\approx} \mid f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}\}$ klas abstrakcji relacji \approx wprowadzamy relację \preceq przyjmując, że

$$[f]_{\approx} \preceq [g]_{\approx} \stackrel{\text{df}}{\iff} f \preceq g.$$

Zadanie 505. Wykaż, że definicja relacji \preceq na zbiorze \mathcal{F} jest poprawna (nie zależy od wyboru reprezentantów klas abstrakcji) i że relacja \preceq jest częściowym porządkiem na \mathcal{F} .

Zadanie 506. Niech dana będzie funkcja $e(n) = 2^n$ i rodzina funkcji $f_k(n) = n^k$ dla $k \in \mathbb{N}$. Wykaż, że dla żadnego k funkcja f_k nie majoryzuje funkcji e .

Zadanie 507. Czy istnieje taki ciąg funkcji $\langle f_i : i \in \mathbb{N} \rangle$, że $f_i \preceq f_{i+1}$ dla $i \in \mathbb{N}$, oraz dla każdej funkcji $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ istnieje i takie, że $g \preceq f_i$?

Zadanie 508. Wykaż, że każdy przeliczalny podzbiór $X \subseteq \mathcal{F}$ posiada w zbiorze \mathcal{F} ograniczenie górne.

Zadanie 509. Niech $\{A_i \mid i \in \mathbb{N}\}$ będzie podziałem zbioru \mathbb{N} na zbiory nieskończone. Definiujemy ciąg funkcji $\langle f_j : j \in \mathbb{N} \rangle$ kładąc

$$f_j(n) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } n \in \bigcup_{i=1}^j A_i, \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

Wykaż, że zbiór $\{[f_j]_{\approx} \mid j \in \mathbb{N}\}$ nie ma kresu górnego w $\langle \mathcal{F}, \preceq \rangle$.

Definicja 159. *Nieskończonym łańcuchem wstępującym* w zbiorze uporządkowanym $\langle A, \leq \rangle$ nazywamy ciąg $\langle a_i : i \in \mathbb{N} \rangle$ taki, że $a_i < a_{i+1}$ dla każdego $i \in \mathbb{N}$, gdzie $a < b$ oznacza, że $a \leq b$ i $a \neq b$. Podobnie ciąg $\langle a_i : i \in \mathbb{N} \rangle$ jest *łańcuchem zstępującym*, jeśli $a_{i+1} < a_i$ dla każdego $i \in \mathbb{N}$.

Zadanie 510. Wykaż, że żaden przeliczalny nieskończony ściśle wstępujący łańcuch nie posiada w zbiorze \mathcal{F} kresu górnego.

Zadanie 511. Jak jest największa moc ściśle a) wstępującego, b) zstępującego łańcucha w zbiorze \mathcal{F} ?

Zadanie 512. Na zbiorze $\{0, 1\}$ wprowadzamy porządek \leq kładąc $0 \leq 1$. Niech \preceq będzie porządkiem leksykograficznym na zbiorze $\{0, 1\}^*$ wyznaczonym przez porządek \leq . Wykaż, że w zbiorze $\langle \{0, 1\}^*, \preceq \rangle$ istnieje nieskończony łańcuch wstępujący i nieskończony łańcuch zstępujący. Czy zbiór $\langle \{0, 1\}^*, \preceq \rangle$ posiada element najmniejszy lub największy?

10.1. Kraty

Definicja 160. Porządek $\langle P, \leq \rangle$ jest *kratą zupełną*, jeśli każdy podzbiór zbioru P ma kres górny i kres dolny. Porządek $\langle P, \leq \rangle$ jest *kratą*, jeśli posiada elementy najmniejszy i największy oraz gdy każdy *skończony* podzbiór zbioru P ma kres górny i kres dolny.

Przykład 161. Dla dowolnego zbioru A rodzina $\mathcal{P}(A)$ uporządkowana relacją inkluzji \subseteq jest kratą zupełną.

Twierdzenie 162. Niech $\langle P, \leq \rangle$ będzie porządkiem. Wtedy następujące warunki są równoważne:

1. $\langle P, \leq \rangle$ jest kratą zupełną.
2. Każdy podzbiór P ma kres górny w $\langle P, \leq \rangle$.
3. Każdy podzbiór P ma kres dolny w $\langle P, \leq \rangle$.

Zadanie 513. Niech A będzie dowolnym zbiorem niepustym. Czy $\langle \mathcal{K}, \subseteq \rangle$ jest kratą zupełną, jeżeli \mathcal{K} jest rodziną wszystkich

1. relacji binarnych,
2. relacji równoważności,
3. relacji częściowego porządku

na zbiorze A ?

Zadanie 514. Niech \mathcal{X} będzie przeliczalną rodziną podzbiorów \mathbb{N} . Udowodnij, że istnieje przeliczalna rodzina \mathcal{K} , taka, że $\mathcal{X} \subseteq \mathcal{K}$ i $\langle \mathcal{K}, \subseteq \rangle$ jest kratą.

Zadanie 515. Czy porządek z zadania 467 jest a) kratą, b) kratą zupełną?

10.2. Porządkı zupełne

Definicja 163. Niech $\langle P, \leq_P \rangle$ będzie zbiorem częściowo uporządkowanym. Wtedy zbiór $\emptyset \neq X \subseteq P$ jest zbiorem *skierowanym*, jeśli każda para $x, y \in X$ elementów zbioru X ma w X ograniczenie górne, tj. prawdziwa jest formuła

$$\forall x, y \in X \exists z \in X (x \leq z \wedge y \leq z).$$

Zbiór $\langle P, \leq_P \rangle$ jest *porządkiem zupełnym*, jeśli P ma element najmniejszy oraz każdy skierowany podzbiór X zbioru P ma kres górny.

Definicja 164. Na zbiorze $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ określamy relację równoważności \sim wzorem

$$X \sim Y \quad \text{wtw} \quad |X \div Y| < \aleph_0$$

(patrz zadanie 313). W zbiorze klas abstrakcji $\mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim$ wprowadzamy taką relację \leq , że

$$[X]_{\sim} \leq [Y]_{\sim} \quad \text{wtw} \quad |X \setminus Y| < \aleph_0.$$

Zadanie 516. Sprawdź, czy definicja \leq jest poprawna.

Zadanie 517. Sprawdź, czy \leq jest porządkiem częściowym.

Zadanie 518. Znajdź w $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim, \leq \rangle$ nieskończony podzbiór liniowo uporządkowany.

Zadanie 519. Znajdź w $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim, \leq \rangle$ nieskończony antyłańcuch.

Zadanie 520. Wykaż, że $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim, \leq \rangle$ nie jest zupełny.

Zadanie 521. Niech Z oznacza zbiór wszystkich nieskończonych podzbiorów zbioru liczb naturalnych. Wykaż, że każdy ściśle malejący ciąg $x_1 > x_2 > x_3 > \dots$ elementów $\langle Z/\sim, \leq \rangle$ (gdzie $x > y$ gdy $y \leq x$ i $y \neq x$) ma w Z/\sim ograniczenie dolne, tj. istnieje taka klasa abstrakcji $y \in Z/\sim$, że $y \leq x_i$ dla każdego i .

Zadanie 522. Czy $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim, \leq \rangle$ jest kratą?

Definicja 165. W zbiorze $\mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim$ definiujemy porządek \preceq kładąc $[X]_{\sim} \preceq [Y]_{\sim}$, jeśli $X \cup Y \in [Y]_{\sim}$.

Zadanie 523. Sprawdź, czy powyższa definicja jest poprawna. Czy $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim, \preceq \rangle$ jest kratą?

Zadanie 524. Czy zbiór $\{[X_n]_{\sim} \mid n \in \mathbb{N}\}$, gdzie $X_n = \{2^n k \mid k \in \mathbb{N}\}$ ma kres dolny w $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim, \preceq \rangle$?

Zadanie 525. Czy w $\langle \mathcal{P}(\mathbb{N})/\sim, \preceq \rangle$ istnieje nieskończony antyłańcuch?

Definicja 166. Niech $\langle P, \leq_P \rangle$ oraz $\langle Q, \leq_Q \rangle$ będą porządkami zupełnymi. Funkcja $f : P \rightarrow Q$ jest *ciągła*, jeśli zachowuje kresy górne, to znaczy, gdy dla dowolnego zbioru skierowanego $X \subseteq P$ zbiór $f(X)$ ma kres górny oraz $f(\bigvee X) = \bigvee f(X)$.

Twierdzenie 167.

1. Każda funkcja ciągła jest monotoniczna.
2. Złożenie funkcji ciągłych jest funkcją ciągłą.

Zadanie 526. Udowodnij, że jeśli $\langle P, \leq_P \rangle$ jest skończoną kratą to każda monotoniczna funkcja $f : P \rightarrow P$ jest ciągła.

Zadanie 527. Pokaż, że relacja inkluzji na rodzinie skończonych podzbiorów zbioru liczb naturalnych nie jest porządkiem zupełnym.

Zadanie 528. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą porządkami zupełnymi. W produkcie $A \times B$ definiujemy relację \leq w następujący sposób: $\langle a_1, b_1 \rangle \leq \langle a_2, b_2 \rangle$ wtedy i tylko wtedy, gdy $a_1 \leq_A a_2$ oraz $b_1 \leq_B b_2$. Udowodnij, że $\langle A \times B, \leq \rangle$ jest porządkiem zupełnym.

Zadanie 529. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą porządkami zupełnymi. W produkcie $A \times B$ definiujemy relację \leq jako rozszerzenie leksykograficzne obu porządków, czyli $\langle a_1, b_1 \rangle \leq \langle a_2, b_2 \rangle$ wtedy i tylko wtedy, gdy $a_1 <_A a_2$ lub gdy $a_1 = a_2$ i $b_1 \leq_B b_2$. Udowodnij, że $\langle A \times B, \leq \rangle$ jest porządkiem zupełnym.

Zadanie 530. Podaj przykład takiego porządku zupełnego $\langle A, \leq \rangle$, że porządek leksykograficzny na A^* generowany przez \leq nie jest zupełny.

Zadanie 531. Niech A będzie zbiorem niepustym oraz niech $\langle B, \leq_B \rangle$ będzie porządkiem częściowym zupełnym. Wykaż, że $\langle B^A, \leq \rangle$ jest porządkiem zupełnym, gdzie $f \leq g$ dla $f, g \in B^A$, wtedy i tylko wtedy, gdy $f(a) \leq_B g(a)$ dla każdego $a \in A$.

Zadanie 532. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ oraz $\langle B, \leq_B \rangle$ będą porządkami częściowymi zupełnymi. Wykaż, że $\langle [A, B], \leq \rangle$ jest porządkiem zupełnym, gdzie $[A, B]$ oznacza zbiór funkcji ciągłych z A w B oraz $f \leq g$, dla $f, g \in B^A$, wtedy i tylko wtedy, gdy $f(a) \leq_B g(a)$ dla każdego $a \in A$.

Zadanie 533. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą porządkami zupełnymi. Pokaż, że funkcja $\phi : [A, B] \times A \rightarrow B$, gdzie $[A, B]$ jest zbiorem funkcji ciągłych z A w B , zdefiniowana wzorem $\phi(f, a) = f(a)$ jest ciągła.

Zadanie 534. Wykaż, że dla dowolnych zbiorów A i B relacja inkluzji na zbiorze $B^{\subseteq A}$ funkcji częściowych z A w B jest porządkiem zupełnym. Czy $\langle B^{\subseteq A}, \subseteq \rangle$ jest kratą zupełną?

Zadanie 535. Zbiór W na płaszczyźnie jest *wypukły*, jeśli wraz z każdymi dwoma punktami zawiera cały łączący je odcinek, tj. gdy $\overline{ab} \subseteq W$ dla dowolnych punktów $a, b \in W$. Pokaż, że relacja inkluzji na rodzinie wypukłych podzbiorów płaszczyzny jest porządkiem zupełnym.

Zadanie 536. Czy porządek z zadania 467 jest zupełny?

10.3. Twierdzenia o punkcie stałym

Twierdzenie 168 (Knaster, Tarski). Niech $\langle P, \leq \rangle$ będzie kratą zupełną i niech funkcja $f : P \rightarrow P$ będzie monotoniczna. Wtedy istnieje $a \in P$ taki, że

1. $f(a) = a$
2. dla każdego $b \in P$, jeśli $f(b) = b$, to $a \leq b$.

Element a z twierdzenia Knastera-Tarskiego nazywamy *najmniejszym punktem stałym* funkcji f . Element spełniający tylko warunek 1 nazywamy *punktem stałym*.

Twierdzenie 169 (Kleene). Niech $\langle P, \leq_P \rangle$ będzie porządkiem zupełnym oraz niech funkcja $f : P \rightarrow P$ będzie ciągła. Wtedy element $a = \bigvee \{f^n(\perp) \mid n \in \mathbb{N}\}$ jest najmniejszym punktem stałym funkcji f .

Zadanie 537. Niech $A \neq \emptyset$ i niech $f : A \rightarrow A$. Udowodnij, że dla dowolnego $a \in A$ istnieje najmniejszy zbiór $X \subseteq A$ taki, że $a \in X$ oraz $f^{-1}(X) \subseteq X$.

Zadanie 538. Niech $\mathcal{K} = \mathcal{P}(A^2)$ będzie zbiorem uporządkowanym relacją inkluzji \subseteq , $R \in \mathcal{K}$ i niech funkcja $\phi_R : \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{K}$ będzie zdefiniowana wzorem

$$\phi_R(X) = X \cup X^{-1} \cup XX \cup E_A \cup R,$$

gdzie $E_A = \{\langle x, x \rangle \mid x \in A\}$. Wykaż, że dla każdej relacji $R \subseteq A^2$ istnieje najmniejszy punkt stały funkcji ϕ_R .

Zadanie 539. Niech R^+ będzie najmniejszym punktem stałym funkcji ϕ_R . Wykaż, że R^+ jest najmniejszą (względem relacji inkluzji \subseteq) relacją równoważności zawierającą relację R .

Zadanie 540. Na rodzinie $\mathcal{L} = \mathcal{P}(\{0, 1\}^*)$ wszystkich języków nad alfabetem $\{0, 1\}$ określamy funkcję

$$f(X) = X \cup \{w01 \mid w \in X\} \cup \{\epsilon\}.$$

Znajdź najmniejszy punkt stały funkcji f w zbiorze \mathcal{L} uporządkowanym relacją inkluzji. Czy istnieje największy punkt stały tej funkcji? Ile punktów stałych ma funkcja $g(X) = \{w01 \mid w \in X\} \cup \{\epsilon\}$?

Zadanie 541. Grafem skierowanym o wierzchołkach V i krawędziach E nazywamy taką parę $\langle V, E \rangle$, że V jest skończonym zbiorem oraz $E \subseteq V \times V$. Ścieżką (długości n , o początku w v_0 i końcu w v_n) w grafie $\langle V, E \rangle$ nazywamy taki ciąg wierzchołków $\langle v_0, \dots, v_n \rangle$, że dla wszystkich $0 \leq i \leq n-1$ zachodzi $\langle v_i, v_{i+1} \rangle \in E$ (w szczególności dla dowolnego wierzchołka v ciąg $\langle v \rangle$ jest ścieżką długości 0). Mówimy, że wierzchołek v jest osiągalny z wierzchołka v_0 jeśli w grafie istnieje ścieżka o początku w v_0 i końcu w v . Udowodnij, że zbiór wierzchołków osiągalnych z v_0 w grafie $\langle V, E \rangle$ jest najmniejszym punktem stałym funkcji $f : \mathcal{P}(V) \rightarrow \mathcal{P}(V)$ zadanej wzorem

$$f(X) = \{v_0\} \cup \{v \in V \mid \exists x \in X \langle x, v \rangle \in E\}.$$

Zadanie 542. Niech $R \subseteq A^2$ będzie relacją binarną na zbiorze A . Udowodnij, że przechodnie domknięcie relacji R jest najmniejszym punktem stałym funkcji $f : \mathcal{P}(A^2) \rightarrow \mathcal{P}(A^2)$ danej wzorem $f(X) = R \cup XX$.

10.4. Relacje w zbiorze formuł zdaniowych

Definicja 170. Niech V będzie zbiorem zmiennych zdaniowych. W zbiorze $\mathcal{F}(V)$ formuł zdaniowych, zbudowanych ze zmiennych ze zbioru V , spójnika negacji \neg i spójników koniunkcji \wedge , alternatywy \vee , implikacji \Rightarrow i równoważności \Leftrightarrow wprowadzamy binarną relację \sim przyjmując, że:

$\alpha \sim \beta$ wtedy i tylko wtedy, gdy formuła $(\alpha \Leftrightarrow \beta)$ jest tautologią.

Zadanie 543. Wykaż, że \sim jest relacją równoważności.

Zadanie 544. W zbiorze $\mathcal{F}(V)$ wprowadzamy relacje \sim_1, \sim_2 i \sim_3 przyjmując, że

- $\alpha \sim_1 \beta$ wtedy i tylko wtedy, gdy formuła $(\alpha \Leftrightarrow \beta)$ jest spełnialna;
- $\alpha \sim_2 \beta$ wtedy i tylko wtedy, gdy formuła $(\alpha \Leftrightarrow \beta)$ jest sprzeczna;
- $\alpha \sim_3 \beta$ wtedy i tylko wtedy, gdy formuła $(\alpha \Leftrightarrow \beta)$ jest prawdziwa dla dokładnie połowy wartościowań zmiennych występujących w formułach α i β .

Które z tych relacji są relacjami równoważności?

Definicja 171. Niech $\phi_a \in \mathcal{F}(V)$ będzie ustaloną formułą. W zbiorze formuł zdaniowych $\mathcal{F}(V)$ wprowadzamy binarną relację \sim_{ϕ_a} , przyjmując, że

$\phi_1 \sim_{\phi_a} \phi_2$ wtedy i tylko wtedy, gdy formuła $(\phi_a \Rightarrow (\phi_1 \Leftrightarrow \phi_2))$ jest tautologią.

Zadanie 545. Udowodnij, że \sim_{ϕ_a} jest relacją równoważności. Opisz klasy równoważności formuł $p \vee \neg p$ i $p \wedge \neg p$.

Definicja 172. W zbiorze klas abstrakcji $\mathcal{F}(V)/\sim$ wyżej opisanej relacji \sim wprowadzamy relację \leq taką, że $[\phi_1]_{\sim} \leq [\phi_2]_{\sim}$ wtedy i tylko wtedy, gdy $\phi_1 \Rightarrow \phi_2$ jest tautologią.

Zadanie 546. Sprawdź, że powyższa definicja relacji \leq jest poprawna (nie zależy od wyboru reprezentanta klasy abstrakcji) i że definiuje porządek częściowy.

Zadanie 547. Czy $\langle \mathcal{F}(V)/\sim, \leq \rangle$ jest kratą?

Zadanie 548. Czy $\langle \mathcal{F}(V)/\sim, \leq \rangle$ jest kratą zupełną?

Zadanie 549. Przyjmijmy, że zbiór zmiennych V jest przeliczalny nieskończony. Znajdź w zbiorze $\langle \mathcal{F}(V)/\sim, \leq \rangle$ nieskończony podzbiór liniowo uporządkowany (łańcuch).

Zadanie 550. Przyjmijmy, że zbiór zmiennych V jest przeliczalny nieskończony. Czy można w zbiorze $\langle \mathcal{F}(V)/\sim, \leq \rangle$ znaleźć nieskończony antyłańcuch?

Zadanie 551. Ile jest klas abstrakcji relacji \sim gdy a) $|V| = 2$, b) $|V| = 3$, c) $|V| = 5$, d) $|V| = n \in \mathbb{N}$, e) $|V| = \aleph_0$?

Zadanie 552. Wypisz najkrótszych reprezentantów wszystkich klas abstrakcji relacji \sim gdy zbiór V ma dwa elementy. Narysuj diagram porządku \leq dla tego przypadku.

Zadanie 553. Wyznacz zbiór elementów minimalnych i kres dolny zbioru $F_1 = \mathcal{F}(V)/\sim \setminus \{[\perp]_{\sim}\}$, gdy zbiór zmiennych V jest (a) skończony i (b) nieskończony.

Zadanie 554. Niech $V = \{p_n\}_{n=0}^{\infty}$ będzie zbiorem zmiennych. Wyznacz kresy (dolny i górny) zbiorów $F_2 = \{[a_n]_{\sim}\}_{n=0}^{\infty}$ i $F_3 = \{[\beta_n]_{\sim}\}_{n=0}^{\infty}$, gdzie $a_n = \bigwedge_{i=1}^n p_i = p_1 \wedge \dots \wedge p_n$ i $\beta_n = \bigvee_{i=1}^n p_i = p_1 \vee \dots \vee p_n$.

Zadanie 555. Niech $V = \{p_n\}_{n=0}^{\infty}$ będzie zbiorem zmiennych. Wyznacz kresy (dolny i górny) zbioru $F_4 = \{[\gamma_n]_{\sim}\}_{n=0}^{\infty}$, gdzie $\gamma_n = \bigvee_{i=0}^n (p_{2i} \vee \neg p_{2i+1})$.

Zadanie 556. W zbiorze $\mathcal{F}(V)$, gdzie $V = \{p_1, \dots, p_5\}$, definiujemy relacje R_1 , R_2 oraz R_3 w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \phi R_1 \psi &\Leftrightarrow \phi \text{ i } \psi \text{ mają tyle samo wystąpień spójników logicznych} \\ \phi R_2 \psi &\Leftrightarrow (\phi \Leftrightarrow \psi) \text{ jest tautologią} \\ \phi R_3 \psi &\Leftrightarrow (\phi \Leftrightarrow \psi) \text{ jest formułą spełnialną} \end{aligned}$$

Która z relacji R_1 , R_2 oraz R_3 jest relacją równoważności? W każdym przypadku w razie pozytywnej odpowiedzi wyznacz moc zbioru klas abstrakcji danej relacji.

Dobre porządki i indukcja

11.1. Porządki regularne

Definicja 173. Porządek częściowy $\langle P, \leq \rangle$ jest *regularny* (*dobrze ufundowany*), jeśli w każdym niepustym zbiorze $X \subseteq P$ istnieje element minimalny. Mówimy, że porządek jest *dobry*, jeśli jest liniowy i regularny.

Twierdzenie 174.¹ Jeśli porządek $\langle P, \leq \rangle$ jest regularny, to w zbiorze P nie istnieje nieskończony ciąg ściśle malejący, tj taki ciąg a_0, a_1, a_2, \dots , że $a_{i+1} < a_i$ dla wszystkich $i \in \mathbb{N}$.

Zadanie 557. Pokaż, że porządek $\langle \mathbb{N}, | \rangle$ (por. Przykład 133) jest regularny.

Zadanie 558. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą zbiorami uporządkowanymi, w których porządki \leq_A i \leq_B są regularne. Na zbiorze $A \times B$ definiujemy relację \leq przyjmując, że $\langle x_1, y_1 \rangle \leq \langle x_2, y_2 \rangle$ wtedy i tylko wtedy, gdy $x_1 \leq_A x_2$ i $y_1 \leq_B y_2$, dla wszelkich $x_1, x_2 \in A$ i $y_1, y_2 \in B$. Wykaż, że relacja \leq jest porządkiem regularnym na zbiorze $A \times B$.

Zadanie 559. Niech $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$ będą dobrymi porządkami. W produkcie $A \times B$ definiujemy relację \leq jako rozszerzenie leksykograficzne obu porządków, czyli $\langle a_1, b_1 \rangle \leq \langle a_2, b_2 \rangle$ wtedy i tylko wtedy, gdy $a_1 <_A a_2$ lub gdy $a_1 = a_2$ i $b_1 \leq_B b_2$. Udowodnij, że $\langle A \times B, \leq \rangle$ jest dobrym porządkiem.

Zadanie 560. Podaj przykład takiego dobrego porządku $\langle A, \leq \rangle$, że porządek leksykograficzny na A^* generowany przez \leq nie jest dobry.

Zadanie 561. Załóżmy, że zbiór $\langle X, R \rangle$ jest dobrze uporządkowany. Znajdź warunek konieczny i dostateczny na to, by zbiór $\langle X, R^{-1} \rangle$ był także dobrze uporządkowany.

¹Przy założeniu aksjomatu wyboru prawdziwe jest również twierdzenie odwrotne.

Zadanie 562. Udowodnij, że jeśli $f : A \rightarrow B$ jest monotoniczną bijekcją między dobrymi porządkami $\langle A, \leq_A \rangle$ i $\langle B, \leq_B \rangle$, to funkcja odwrotna f^{-1} też jest monotoniczna. Czy założenie, że porządki \leq_A i \leq_B są dobre jest istotne?

Zadanie 563. W zbiorze $\mathbb{N} \setminus \{0\}$ wprowadzamy relację R wzorem

$$xRy \stackrel{\text{df}}{\iff} (2|x \wedge 2|y \wedge y \leq x) \vee (2|x \wedge \neg(2|y)) \vee (\neg(2|x) \wedge \neg(2|y) \wedge x \leq y).$$

Udowodnij, że zbiór $\langle \mathbb{N} \setminus \{0\}, R \rangle$ jest liniowo uporządkowany. Czy jest to dobry porządek?

Zadanie 564. Udowodnij, że w zbiorze dobrze uporządkowanym każdy element (poza co najwyżej elementem największym) posiada następnik. Czy każdy element poza elementem pierwszym musi posiadać poprzednik?

Zadanie 565. Dany jest zbiór

$$A = \left\{ n + \frac{m}{m+1} \mid n, m \in \mathbb{N} \right\}.$$

1. Czy $\langle A, \leq \rangle$ jest dobrym porządkiem (\leq jest zwykłą relacją porządku w zbiorze liczb rzeczywistych)?
2. Ile jest nierosnących funkcji z \mathbb{N} w A ?

Zadanie 566. W zbiorze $\mathcal{F} = \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ funkcji z \mathbb{N} w \mathbb{N} wprowadzamy relację \leq_F kładąc

$$f \leq_F g \iff (\forall n \in \mathbb{N})(f(n) \leq g(n)).$$

Czy porządek częściowy $\langle \mathcal{F}, \leq_F \rangle$ jest

1. krata,
2. krata zupełną,
3. porządkiem zupełnym,
4. porządkiem regularnym?

Zadanie 567. Niech $\mathcal{F} = \{f \in \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \mid \{n \in \mathbb{N} \mid f(n) = 1\} \text{ jest skończony}\}$. W zbiorze \mathcal{F} wprowadzamy relacje \leq_F i \leq_L kładąc

$$f \leq_F g \iff \forall n \in \mathbb{N} (f(n) \leq g(n)) \quad \text{oraz}$$

$$f \leq_L g \iff f = g \vee \exists m \in \mathbb{N} (f(m) < g(m) \wedge \forall n \in \mathbb{N} (n < m \Rightarrow f(n) = g(n))).$$

1. Czy $\langle \mathcal{F}, \leq_F \rangle$ jest porządkiem liniowym?
2. Czy $\langle \mathcal{F}, \leq_L \rangle$ jest porządkiem liniowym?

3. Czy $\langle \mathcal{F}, \leq_F \rangle$ jest porządkiem regularnym?
4. Czy $\langle \mathcal{F}, \leq_L \rangle$ jest porządkiem regularnym?
5. Czy $\langle \mathcal{F}, (\leq_F)^{-1} \rangle$ jest porządkiem regularnym?
6. Czy $\langle \mathcal{F}, (\leq_L)^{-1} \rangle$ jest porządkiem regularnym?

Zadanie 568. Czy porządek zadany definicją 164 jest regularny?

Zadanie 569. Czy na zbiorze A o mocy większej niż 1 można zdefiniować porządek jednocześnie dobry i gęsty?

Definicja 175. Binarna relacja R na zbiorze X jest *słabo konfluentna*, jeśli dla każdych $x_1, x_2, x_3 \in X$ istnieje taki $x_4 \in X$, że jeśli $x_1 R x_2$ i $x_1 R x_3$, to $x_2 \bar{R} x_4$ i $x_3 \bar{R} x_4$, gdzie \bar{R} jest przechodnim domknięciem relacji R . Relacja R jest *konfluentna*, jeśli dla każdych $x_1, x_2, x_3 \in X$ istnieje taki $x_4 \in X$, że jeśli $x_1 \bar{R} x_2$ i $x_1 \bar{R} x_3$, to również $x_2 \bar{R} x_4$ i $x_3 \bar{R} x_4$, gdzie \bar{R} jest przechodnim domknięciem relacji R .

Zadanie 570. Pokaż, że istnieje relacja R słabo konfluentna, która nie jest konfluentna.

Zadanie 571. Pokaż, że istnieje relacja R słabo konfluentna, której graf jest acykliczny i która nie jest konfluentna.

Definicja 176. Binarna relacja R na zbiorze X jest *ufundowana* jeśli nie istnieje taki nieskończony ciąg a_0, a_1, a_2, \dots , że $a_i R a_{i+1}$ dla wszystkich $i \in \mathbb{N}$.

Zadanie 572. Pokaż, że jeśli relacja R jest ufundowana i słabo konfluentna, to jest konfluentna.

Zadanie 573. Niech \mathcal{K} będzie taką rodziną podzbiorów zbioru liczb naturalnych, że relacja zawierania na tej rodzinie jest porządkiem regularnym. Pokaż, że każdy łańcuch w tym porządku jest przeliczalny.

Zadanie 574. Dane są dwa niemalejące ciągi liczb naturalnych $\langle a_0, a_1, a_2, \dots \rangle$ oraz $\langle b_0, b_1, b_2, \dots \rangle$. Przypuśćmy, że te ciągi „podobnie rosną”, tzn. dla dowolnej liczby naturalnej n spełnione są warunki:

1. jeżeli $a_n < b_n$, to $a_n < a_{n+1}$ oraz $b_n = b_{n+1}$,
2. jeżeli $b_n < a_n$, to $b_n < b_{n+1}$ oraz $a_n = a_{n+1}$.

Udowodnij, że jeżeli liczba c jest wyrazem obu tych ciągów, to c jest wyrazem tych ciągów o tym samym numerze (tj. istnieje taka liczba $i \in \mathbb{N}$, że $a_i = c = b_i$).

Zadanie 575. Czy porządek z zadania 467 jest regularny?

11.2. Indukcja

Twierdzenie 177 (zasada indukcji). Niech $\langle P, \leq \rangle$ będzie regularnym porządkiem częściowym. Jeśli $X \subseteq P$ spełnia warunek $\forall x ((\forall y < x \ y \in X) \Rightarrow x \in X)$, to $X = P$.

Przykład 178. *Grafem prostym o wierzchołkach V i krawędziach E nazywamy taką parę $\langle V, E \rangle$, że V jest skończonym zbiorem oraz $E \subseteq V \times V$ jest relacją antyzwrotną i symetryczną.² Pokażemy, że dla wszystkich dodatnich liczb naturalnych n każdy n -wierzchołkowy graf prosty ma nie więcej niż $\frac{n(n-1)}{2}$ krawędzi. Skorzystamy w tym celu z zasady indukcji dla $\langle \mathbb{N}^+, \leq \rangle$ (oczywiście jest to porządek regularny).*

Niech

$$X = \left\{ n \in \mathbb{N}^+ \mid \begin{array}{l} \text{każdy } n\text{-wierzchołkowy graf prosty} \\ \text{ma nie więcej niż } \frac{n(n-1)}{2} \text{ krawędzi} \end{array} \right\}.$$

Pokażemy, że spełniony jest warunek

$$\forall n \in \mathbb{N}^+ ((\forall i < n \ i \in X) \Rightarrow n \in X) \quad (1)$$

Weźmy dowolną liczbę $n \in \mathbb{N}^+$ i rozważmy następujące dwa przypadki.

Przypadek 1: $n = 1$. Rozważmy dowolny 1-wierzchołkowy graf $G = \langle V, E \rangle$. Ponieważ relacja E jest antyzwrotna, więc graf G nie ma wcale krawędzi (ich liczba jest ograniczona przez 0). Mamy $0 = \frac{1 \cdot 0}{2}$, co pokazuje, że w tym przypadku $n \in X$ i implikacja

$$(\forall i < n \ i \in X) \Rightarrow n \in X \quad (2)$$

jest prawdziwa.

Przypadek 2: $n > 1$. Załóżmy, że prawdziwy jest warunek $\forall i < n \ i \in X$. Chcemy pokazać, że $n \in X$, czyli że każdy n -wierzchołkowy graf prosty ma nie więcej niż $\frac{n(n-1)}{2}$ krawędzi. Rozważmy zatem dowolny n -wierzchołkowy graf $G = \langle V, E \rangle$. Wybierzmy w zbiorze V dowolny wierzchołek v i usuńmy go z grafu otrzymując graf $G' = \langle V', E' \rangle$, gdzie $V' = V - \{v\}$ oraz $E' = E \cap (V' \times V')$. Graf G' jest $(n-1)$ -wierzchołkowy, więc z założenia indukcyjnego liczba krawędzi w E' jest ograniczona przez $\frac{(n-1)(n-2)}{2}$. W zbiorze $E - E'$ jest co najwyżej $n-1$ krawędzi, a zatem łączna liczba krawędzi w E nie przekracza $\frac{(n-1)(n-2)}{2} + (n-1) = \frac{n(n-1)}{2}$. Ponieważ graf G był wybrany dowolnie, więc każdy n -wierzchołkowy graf ma nie więcej niż $\frac{n(n-1)}{2}$ krawędzi, a zatem $n \in X$ i również w tym przypadku implikacja (2) jest prawdziwa.

Ponieważ liczba n była wybrana jako dowolna, dowiedliśmy prawdziwości warunku (1). Na mocy zasady indukcji otrzymujemy, że $X = \mathbb{N}^+$, czyli dla wszystkich

²W języku teorii grafów oznacza to, że nie ma pętli w wierzchołkach i krawędzie nie są skierowane.

dotatnich liczb naturalnych n każdy n -wierzchołkowy graf prosty ma nie więcej niż $\frac{n(n-1)}{2}$ krawędzi. ■

Okazuje się, że samodzielne sformułowanie powyższego rozumowania sprawia ogromne kłopoty wielu studentom. Poniżej wymieniamy najczęściej spotykane błędy w tego typu rozumowaniach.

- Sprawdzenie podstawy indukcji dla $n = 1$, $n = 2$ i $n = 3$: Zwykle wystarcza rozważenie jednego przypadku bazowego. Sprawdzenie prawdziwości twierdzenia dla drugiej z kolei liczby jest konieczne tylko wtedy, gdy chcemy skorzystać z założenia, że $n - 2 \in X$ (bo dla $n = 2$ mamy $n - 2 \notin \mathbb{N}^+$ i z takiego założenia nie da się skorzystać); tutaj natomiast nie ma takiej potrzeby.
- Użycie sformułowania „teza z zadania dla $n = k$ ”: zwykle student używający takiego sformułowania nie wie, co ono oznacza. W szczególności nie wiadomo, czy oznacza ono „ $k \in X$ ” czy może „ $k \in X \Rightarrow (k + 1) \in X$ ”, czy też „ $\forall k \in X \Rightarrow (k + 1) \in X$ ” czy „ $\forall k \in X$ ”.
- Oparcie dowodu kroku indukcyjnego na schemacie „weźmy dowolny graf $(n - 1)$ -wierzchołkowy i dodajmy do niego wierzchołek”: tu błąd polega na tym, że nie precyzujemy sposobu wyboru tego grafu, a nie każdy graf $(n - 1)$ -wierzchołkowy daje się rozszerzyć do ustalonego grafu n -wierzchołkowego. Na przykład dla $n = 4$ nie da się otrzymać trójramienną gwiazdy dodając wierzchołek do trójkąta.
- Rozpoczęcie dowodu kroku indukcyjnego od sformułowania „niech k będzie liczbą krawędzi w grafie”: tu nie wiadomo o jaki graf chodzi, a nie każdy graf ma tyle samo krawędzi.

Zadania poniżej należy rozwiązywać korzystając z zasady indukcji podanej w Twierdzeniu 177. Z innej wersji zasady indukcji można skorzystać tylko pod warunkiem, że umie się tę inną wersję udowodnić.³

Zadanie 576. Skończony zbiór liniowo uporządkowany $\langle A, \leq_A \rangle$ ma n elementów, a zbiór uporządkowany $\langle B, \leq_B \rangle$ ma 2 elementy, przy czym $A \cap B = \emptyset$. Na ile sposobów można porządek liniowy na A rozszerzyć o elementy zbioru B (to znaczy znaleźć taki porządek liniowy $\langle A \cup B, \leq \rangle$, że $(a_1 \leq_A a_2) \Leftrightarrow (a_1 \leq a_2)$, dla $a_1, a_2 \in A$ oraz $(b_1 \leq_B b_2) \Leftrightarrow (b_1 \leq b_2)$, dla $b_1, b_2 \in B$)? Odpowiedź uzasadnij przy pomocy dowodu przez indukcję.

³Dlaczego? Otóż w przyszłości będziecie musieli często korzystać z indukcji strukturalnej (w której porządek zadany jest przez strukturę termów, grafów, dowodów itp.). Np. przy uzasadnianiu poprawności algorytmu wyprowadzania typu potrzebna będzie indukcja względem budowy dowodu osądu typowego. Teraz nie wiemy jeszcze co to jest osąd typowy, ale jak się dowiemy, to nie będzie już czasu na zastanawianie się co to jest indukcja.

Zadanie 577. Pokaż przez indukcję, że dla każdej formuły zbudowanej ze zmiennych zdaniowych oraz spójników $\vee, \wedge, \Rightarrow, \neg$, liczba wystąpień zmiennych jest o 1 większa od liczby wystąpień binarnych spójników zdaniowych.

Zadanie 578. Pokaż przez indukcję, że dla każda formuła zbudowana ze zmiennych zdaniowych i spójników \wedge, \vee jest spełnialna.

Zadanie 579. Pokaż przez indukcję, że dla każdego zbioru A mocy $n \in \mathbb{N}$ istnieje $n!$ bijekcji $f : A \rightarrow A$.

Zadanie 580. Udowodnij przez indukcję, że każdą liczbę naturalną większą od 1 można przedstawić w postaci iloczynu liczb pierwszych. *Wskazówka:* wybierz odpowiedni porządek.

Zadanie 581. Niech $X \subseteq \mathbb{N}$. Udowodnij, że jeśli

- $0 \in X$, $1 \in X$ oraz $2 \in X$,
- dla dowolnego $x \in \mathbb{N}$, z tego, że $x \in X$, $x + 1 \in X$ oraz $x + 2 \in X$ wynika, że $x + 3 \in X$,

to $X = \mathbb{N}$.

Zadanie 582. Mówimy, że graf prosty $G = \langle V, E \rangle$ jest *spójny*, jeśli zwrotne i przechodnie domknięcie relacji E jest równe $V \times V$ (w języku teorii grafów oznacza to, że każde dwa wierzchołki są połączone ścieżką). Pokaż przez indukcję, że (dla wszystkich dodatnich liczb naturalnych n) każdy n -wierzchołkowy graf spójny ma co najmniej $n - 1$ krawędzi.

Zadanie 583. Funkcja Ackermanna zdefiniowana jest wzorem

$$A(x, y) = \begin{cases} y + 1, & \text{dla } x = 0 \\ A(x - 1, 1) & \text{dla } x > 0 \text{ i } y = 0 \\ A(x - 1, A(x, y - 1)) & \text{wpp} \end{cases}$$

Udowodnij indukcyjnie, że istnieje co najwyżej jedna funkcja spełniająca te równości.

Zadanie 584. Smok Strachota ma (skończenie) wiele głów, a każda jego głowa ma (skończenie) wiele paszcz. Kiedy rycerz odetnie Strachocie głowę, w miejsce odciętej odrasta smokowi tyle głów ile ten sobie zażyczy, ale każda z tych nowych głów ma mniej paszcz niż odcięta głowa.

Stanem smoka nazywamy taką funkcję $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, że $g(i)$ oznacza liczbę głów o i paszczach. Powiemy, że stan smoka jest *bezpieczny* jeśli w skończenie wielu cięciach można pozbawić smoka wszystkich głów. Udowodnij indukcyjnie, że każdy stan smoka jest bezpieczny.

Wskazówka: Główna (i niemal jedyna) trudność tego zadania to zdefiniowanie odpowiedniego porządku na stanach smoka.

Twierdzenie 179 (o definiowaniu przez indukcję). Niech A i B będą dowolnymi zbiorami. Niech $g : A \rightarrow B$ oraz $h : B \times A \times \mathbb{N} \rightarrow B$ będą dowolnymi funkcjami. Wtedy istnieje dokładnie jedna funkcja $f : A \times \mathbb{N} \rightarrow B$ spełniająca warunki:

1. $\forall a \in A \ f(a, 0) = g(a),$
2. $\forall a \in A \ \forall n \in \mathbb{N} \ f(a, n+1) = h(f(a, n), a, n).$

Twierdzenie 180 (drugie twierdzenie o definiowaniu przez indukcję).

Niech A i B będą dowolnymi zbiorami. Niech $g : A \rightarrow B$ oraz $h : B^* \times A \times \mathbb{N} \rightarrow B$ będą dowolnymi funkcjami. Wtedy istnieje dokładnie jedna funkcja $f : A \times \mathbb{N} \rightarrow B$ spełniająca warunki:

1. $\forall a \in A \ f(a, 0) = g(a),$
2. $\forall a \in A \ \forall n \in \mathbb{N} \ f(a, n+1) = h((f(a, 0), \dots, f(a, n)), a, n).$

Twierdzenie 181 (O definiowaniu funkcji przez indukcję noetherowską).

Niech $\langle A, \leq \rangle$ będzie zbiorem regularnym i niech B, C będą dowolnymi zbiorami. Niech $B^{\subseteq A \times C}$ oznacza zbiór funkcji częściowych $z A \times C$ w B . Dla dowolnej funkcji $h : B^{\subseteq A \times C} \times A \times C \rightarrow B$ istnieje dokładnie jedna funkcja spełniająca warunek:

$$f(x, c) = h(f \cap (\{y \in A \mid y < x\} \times C \times B), x, c).$$

Zadanie 585. Udowodnij, że istnieje dokładnie jedna funkcja $suma : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ i dokładnie jedna funkcja $iloczyn : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ spełniająca równania

$$\begin{aligned} suma(n, 0) &= n \\ suma(n, m+1) &= suma(n, m) + 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} iloczyn(n, 0) &= 0 \\ iloczyn(n, m+1) &= n + iloczyn(n, m). \end{aligned}$$

Zadanie 586. Czy istnieje dokładnie jedna funkcja $f : \mathcal{P}(\mathbb{N}) \rightarrow \mathcal{P}(\mathbb{N})$ spełniająca równości $f(\emptyset) = \emptyset$ i $f(X \cup \{n\}) = f(X) \cup \{n\}$ dla wszystkich $n \in \mathbb{N}$?

12

Algebra termów

Definicja 182. *Sygnaturą* nazywamy rodzinę $\{\Sigma_n \mid n \in N\}$ zbiorów parami rozłącznych. Elementy zbioru Σ_n nazywamy *symbolami n -argumentowymi*. Elementy Σ_0 nazywamy *symbolami stałych* (lub po prostu *stałymi*). Kładziemy też $\Sigma = \bigcup_{n=0}^{\infty} \Sigma_n$.

Definicja 183 (Algebra termów). Niech Σ będzie sygnaturą i niech $V = \{v_i \mid i \in \mathbb{N}\}$ będzie zbiorem zmiennych (zakładamy, że $\Sigma \cap V = \emptyset$). Przez $T(\Sigma, V)$ będziemy oznaczać zbiór termów nad Σ , czyli najmniejszy zbiór zawierający zmienne i symbole stałych (to znaczy $V \subseteq T(\Sigma, V)$ i $\Sigma_0 \subseteq T(\Sigma, V)$) i zamknięty względem Σ (to znaczy jeśli $f \in \Sigma_n$, $t_1, \dots, t_n \in T(\Sigma, V)$, to $f(t_1, \dots, t_n) \in T(\Sigma, V)$).

Przez $T(\Sigma)$ będziemy oznaczać zbiór *termów stałych* nad Σ , czyli najmniejszy zbiór zawierający symbole stałych (to znaczy $\Sigma_0 \subseteq T(\Sigma)$) i zamknięty względem Σ (to znaczy jeśli $f \in \Sigma_n$, $t_1, \dots, t_n \in T(\Sigma)$, to $f(t_1, \dots, t_n) \in T(\Sigma)$).

Zbiór termów stałych można też zdefiniować jako zbiór tych termów, w których nie występują zmienne.

12.1. Podstawienia

Definicja 184. Niech Σ będzie sygnaturą a V zbiorem zmiennych. *Podstawieniem* w zbiorze termów $T(\Sigma, V)$ nazywamy funkcję przyporządkowującą zmiennym ze zbioru V elementy $T(\Sigma, V)$.

Podstawienie $\sigma : V \rightarrow T(\Sigma, V)$ rozszerzamy do funkcji $\hat{\sigma} : T(\Sigma, V) \rightarrow T(\Sigma, V)$ kładąc $\hat{\sigma}(x) = \sigma(x)$ dla $x \in V$ oraz $\hat{\sigma}(f(t_1, \dots, t_n)) = f(\hat{\sigma}(t_1), \dots, \hat{\sigma}(t_n))$. Jeśli nie będzie prowadzić to do nieporozumień, będziemy pisali σ zamiast $\hat{\sigma}$.

Term uzyskany z termu t przez zastąpienie każdego wystąpienia zmiennej x w termie t przez term $\sigma(x)$ nazywamy wartością termu t przy podstawieniu σ i oznaczamy $\sigma(t)$ lub $t\sigma$.

W dalszych częściach będziemy często rozważać podstawienia, które zmieniają tylko skończenie wiele zmiennych. Tradycyjnie podstawienie, które zmienia tylko zmienne x_1, \dots, x_n i przyporządkowuje im odpowiednio termy t_1, \dots, t_n oznacza

się przez $[x_1/t_1, \dots, x_n/t_n]$. Dokładniej, $[x_1/t_1, \dots, x_n/t_n] : V \rightarrow T(\Sigma, V)$ jest funkcją zdefiniowaną wzorem

$$[x_1/t_1, \dots, x_n/t_n](v) = \begin{cases} t_i & \text{jeśli } v = x_i \\ v & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

W szczególności $[] : V \rightarrow T(\Sigma, V)$ jest funkcją identycznościową zbioru V . W literaturze można spotkać wiele innych sposobów oznaczania podstawień, takich jak $[t_1/x_1, \dots, t_n/x_n]$, $[x_1 \leftarrow t_1, \dots, x_n \leftarrow t_n]$ czy $[x_1 \mapsto t_1, \dots, x_n \mapsto t_n]$, lub z użyciem nawiasów klamrowych, np. $\{x_1/t_1, \dots, x_n/t_n\}$.

12.2. Problem unifikacji

Definicja 185. Niech Σ będzie sygnaturą. *Problemem unifikacji* nazywamy następujące zadanie: „mając dany zbiór $\{(t_1, s_1), \dots, (t_n, s_n)\}$, znaleźć takie podstawienie σ , żeby dla każdego $i \leq n$ zachodziło $\sigma(t_i) = \sigma(s_i)$.” To znaczy, należy znaleźć takie przyporządkowanie termów zmiennym występującym w termach $t_1, s_1, \dots, t_n, s_n$, żeby po podstawieniu tych termów za odpowiednie zmienne uzyskać termy równe. Podstawienie σ nazywamy *unifikatorem* zbioru $\{(t_1, s_1), \dots, (t_n, s_n)\}$. Często ten zbiór (nazywany czasem *instancją problemu unifikacji*) zapisujemy jako

$$\{t_1 \stackrel{?}{=} s_1, \dots, t_n \stackrel{?}{=} s_n\}.$$

Definicja 186. Jeśli σ i τ są unifikatorami zbioru $\{(t_1, s_1), \dots, (t_n, s_n)\}$, to mówimy, że σ jest *ogólniejsze* od τ , (co oznaczamy $\tau \leq \sigma$) jeśli istnieje takie podstawienie ϱ , że $\tau = \varrho\sigma$. Podstawienie σ nazywamy *najogólniejszym unifikatorem* zbioru

$$\mathcal{S} = \{t_1 \stackrel{?}{=} s_1, \dots, t_n \stackrel{?}{=} s_n\},$$

jeśli σ jest unifikatorem \mathcal{S} oraz σ jest ogólniejsze od każdego innego unifikatora \mathcal{S} .

Algorytm podany na rysunku 13 dla zadanej instancji problemu unifikacji znajduje jego najogólniejszy unifikator lub odpowiada „nie ma unifikatora”. Dla przypomnienia: $[x/t][\mathcal{S}]$ oznacza obraz zbioru \mathcal{S} przez rozszerzenie podstawienia $[x/t]$, natomiast $[x/t]\sigma$ oznacza złożenie funkcji σ i $[x/t]$, przy czym najpierw wykonywana jest funkcja σ .

Zadanie 587. Udowodnij, że algorytm z rysunku 13 zawsze się zatrzymuje.

Zadanie 588. W algebrze termów o sygnaturze $\Sigma = \{a, c, d, f, g, h, p\}$ i zbiorze zmiennych $\mathcal{X} = \{u, v, w, x, y, z, \dots\}$ znajdź (lub uzasadnij, że nie istnieje) najogólniejszy unifikator dla podanych instancji problemu unifikacji.

1. $\{f(x, f(x, c, g(z))), f(g(g(z)), x, g(c))\} \stackrel{?}{=} f(f(u, v, v), y, y)$

wejście: zbiór równań $\mathcal{S} = \{t_1 \stackrel{?}{=} s_1, \dots, t_n \stackrel{?}{=} s_n\}$

wyjście: najogólniejszy unifikator σ zbioru \mathcal{S} lub “nie ma unifikatora”

```

 $\sigma \leftarrow []$ 
while  $\mathcal{S} \neq \emptyset$  do
  select  $t \stackrel{?}{=} s$  from  $\mathcal{S}$ 
  case  $t \stackrel{?}{=} s$  of
     $f(t'_1, \dots, t'_k) \stackrel{?}{=} f(s'_1, \dots, s'_k)$ :
       $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{t'_1 \stackrel{?}{=} s'_1, \dots, t'_k \stackrel{?}{=} s'_k\}$ 
     $f(t'_1, \dots, t'_k) \stackrel{?}{=} g(s'_1, \dots, s'_l)$  where  $f \neq g$ :
      return nie ma unifikatora
     $x \stackrel{?}{=} t$ , where  $x \in \mathcal{V}$ :
      if  $x \in \text{FV}(t)$  and  $x \neq t$  then
        return nie ma unifikatora
      else
         $\mathcal{S} \leftarrow [x/\hat{t}][\mathcal{S}]$ 
         $\sigma \leftarrow [x/t]\sigma$ 
     $t \stackrel{?}{=} x$ , where  $x \in \mathcal{V}$  and  $t \notin \mathcal{V}$ :
       $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{x \stackrel{?}{=} t\}$ 
return  $\sigma$ 

```

Rysunek 13. Algorytm unifikacji

2. $\{f(f(d, y), f(z, x)) \stackrel{?}{=} f(f(y, z), f(x, c))\}$
3. $\{f(f(x, y), f(z, u)) \stackrel{?}{=} f(f(f(f(u, u), f(u, u)), f(f(x, x), f(x, x))), f(f(f(y, y), f(y, y)), f(f(u, u), f(u, u))))\}$
4. $\{f(x_1, x_1) \stackrel{?}{=} x_2, f(x_2, x_2) \stackrel{?}{=} x_3, \dots, f(x_{n-1}, x_{n-1}) \stackrel{?}{=} x_n\}$
5. $\{p(f(y), w, g(z)) \stackrel{?}{=} p(v, u, v)\}$
6. $\{p(a, x, f(g(y))) \stackrel{?}{=} p(z, h(w), f(w))\}$
7. $\{p(z, h(w), g(z)) \stackrel{?}{=} p(v, u, v)\}$

Następne trzy zadania są lematami służącymi do udowodnienia poprawności algorytmu unifikacji z rysunku 13. Nie wolno więc w ich rozwiązaniu korzystać z poprawności tego algorytmu.

Zadanie 589. Udowodnij, że jeśli θ jest unifikatorem $\{x \stackrel{?}{=} t\}$ to istnieje takie podstawienie σ , że $\theta = \sigma[x/t]$.

Zadanie 590. Udowodnij, że jeśli zmienna x występuje w termie t i $t \neq x$ to nie istnieje unifikator $\{x \stackrel{?}{=} t\}$.

Zadanie 591. Udowodnij, że jeśli zmienna x nie występuje w termie t to $[x/t]$ jest najbardziej ogólnym unifikatorem $\{x \stackrel{?}{=} t\}$.

Zadanie 592. W tym zadaniu będziemy rozważać zadania unifikacji składające się z nieskończonej liczby par termów. Udowodnij następujące twierdzenie o zwartości dla problemu unifikacji: zadanie unifikacji $\{t_i \stackrel{?}{=} s_i\}_{i \in I}$, w którym występuje jedynie skończenie wiele różnych zmiennych, ma rozwiązanie wtedy i tylko wtedy, gdy każde jego skończone podzadanie $\{t_i \stackrel{?}{=} s_i\}_{i \in I_0}$, dla $I_0 \subseteq I$, $|I_0| < \infty$, ma rozwiązanie. Pokaż, że twierdzenie jest fałszywe, jeśli zadanie zawiera nieskończenie wiele zmiennych.

Elementy logiki formalnej

Definicja 187. *Sygnaturą* języka pierwszego rzędu nazywamy zbiór $\Sigma = \Sigma^F \cup \Sigma^R$, gdzie Σ^F jest zbiorem *symboli funkcyjnych* a Σ^R zbiorem *symboli relacyjnych*, przy czym $\Sigma^F = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} \Sigma_i^F$ i $\Sigma^R = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} \Sigma_i^R$, gdzie Σ_i^F i Σ_i^R są odpowiednio zbiorami i -argumentowych ($i \geq 0$) symboli funkcyjnych i relacyjnych.

13.1. Semantyka języka pierwszego rzędu

Definicja 188. *Struktura* \mathfrak{A} sygnatury Σ to niepusty zbiór A zwany jej *uniwersum* i *interpretacja*, czyli funkcja $\cdot^{\mathfrak{A}}$, która każdemu symbolowi funkcji $f \in \Sigma_n^F$, gdzie $n \geq 0$, przyporządkowuje funkcję $f^{\mathfrak{A}} : A^n \rightarrow A$, każdemu symbolowi relacji $R \in \Sigma_n^R$, gdzie $n > 0$, przyporządkowuje relację $R^{\mathfrak{A}} \subseteq A^n$ i każdemu symbolowi $R \in \Sigma_0^R$ przyporządkowuje wartość logiczną ze zbioru $\{T, F\}$.

Definicja 189. *Wartościowaniem* w strukturze \mathfrak{A} nazywamy dowolną funkcję $v : V \rightarrow A$. Ponadto niech

$$(v_x^a)(y) = \begin{cases} v(y), & \text{gdy } x \neq y, \\ a, & \text{gdy } x = y, \end{cases}$$

dla dowolnego wartościowania $v : V \rightarrow A$, zmiennej $x \in V$ i elementu $a \in A$.

Definicja 190. Dla dowolnego termu z $\mathcal{T}(\Sigma^F, V)$ definiujemy indukcyjnie jego *interpretację* $t^{\mathfrak{A}}[v]$ przy zadanym wartościowaniu zmiennych $v : V \rightarrow A$:

$$\begin{aligned} x^{\mathfrak{A}}[v] &= v(x) \\ (f(t_1, \dots, t_n))^{\mathfrak{A}}[v] &= f^{\mathfrak{A}}(t_1^{\mathfrak{A}}[v], \dots, t_n^{\mathfrak{A}}[v]) \end{aligned}$$

Definicja 191. Poniżej definiujemy indukcyjnie relację \models . Gdy ona zachodzi, co oznaczamy $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$, to mówimy że *struktura* \mathfrak{A} *spełnia formułę* α *przy wartościowaniu* v .

1. Zawsze (tj. dla wszystkich struktur i wartościowań) zachodzi $\mathfrak{A} \models \top[v]$, nigdy nie zachodzi $\mathfrak{A} \models \perp[v]$.
2. $\mathfrak{A} \models R(t_1, \dots, t_n)[v]$ wtw gdy $(t_1^{\mathfrak{A}}[v], \dots, t_n^{\mathfrak{A}}[v]) \in R^{\mathfrak{A}}$.
3. $\mathfrak{A} \models (t_1 = t_2)[v]$ wtw gdy $t_1^{\mathfrak{A}}[v] = t_2^{\mathfrak{A}}[v]$.
4. $\mathfrak{A} \models (\neg\alpha)[v]$ wtw gdy nie zachodzi $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$
5. $\mathfrak{A} \models (\alpha \wedge \beta)[v]$ wtw gdy zachodzą jednocześnie $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$ i $\mathfrak{A} \models \beta[v]$.
6. $\mathfrak{A} \models (\alpha \vee \beta)[v]$ wtw gdy $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$ lub $\mathfrak{A} \models \beta[v]$.
7. $\mathfrak{A} \models (\alpha \Rightarrow \beta)[v]$ wtw gdy nie zachodzi $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$ lub zachodzi $\mathfrak{A} \models \beta[v]$.
8. $\mathfrak{A} \models (\alpha \Leftrightarrow \beta)[v]$ wtw gdy jednocześnie nie zachodzą $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$ i $\mathfrak{A} \models \beta[v]$, lub jednocześnie zachodzą $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$ i $\mathfrak{A} \models \beta[v]$.
9. $\mathfrak{A} \models (\forall x.\alpha)[v]$ wtw gdy dla każdego elementu $a \in A$ zachodzi $\mathfrak{A} \models \alpha[v_x^a]$.
10. $\mathfrak{A} \models (\exists x.\alpha)[v]$ wtw gdy istnieje element $a \in A$ dla którego zachodzi $\mathfrak{A} \models \alpha[v_x^a]$.

Definicja 192. Formuła α jest *spełnialna* w \mathfrak{A} , jeśli istnieje wartościowanie $v : V \rightarrow A$ dla którego zachodzi $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$. Formuła α jest *spełnialna*, jeśli istnieje struktura \mathfrak{A} , w której α jest spełnialna. Formuła α jest *prawdziwa* w \mathfrak{A} (struktura \mathfrak{A} jest *modelem dla α*), jeśli dla każdego wartościowania $v : V \rightarrow A$ zachodzi $\mathfrak{A} \models \alpha[v]$. Formuła α jest *prawdziwa* (jest *tautologią*), jeśli dla każdej struktury \mathfrak{A} , formuła α jest prawdziwa w \mathfrak{A} .

Zadanie 593. Korzystając wprost z definicji semantyki języka pierwszego rzędu pokaż, że formuła $\forall x \exists y \ x < y$ jest prawdziwa w strukturze, której uniwersum jest zbiór liczb naturalnych a interpretacją symbolu $<$ jest naturalny porządek na liczbach.

Zadanie 594. Niech ϕ i ψ będą formułami logiki pierwszego rzędu. Korzystając wprost z definicji semantyki języka pierwszego rzędu udowodnij, że następujące formuły są tautologiami.

- $(\exists x \phi \Rightarrow \psi) \Rightarrow \forall x \phi \Rightarrow \exists x \psi$
- $(\forall x \phi \Rightarrow \psi) \Rightarrow \exists x \phi \Rightarrow \exists x \psi$

Zadanie 595. Udowodnij, że dla każdej formuły logiki pierwszego rzędu istnieje równoważna jej formuła nie zawierająca kwantyfikatorów \forall .

Zadanie 596. Rozważmy dwa izomorficzne porządki $\mathcal{A} = \langle A, \leq_A \rangle$ i $\mathcal{B} = \langle B, \leq_B \rangle$. Traktujemy te porządki jak struktury nad sygnaturą bez symboli funkcyjnych i z jednym symbolem relacyjnym \leq , w których relacje \leq_A i \leq_B są interpretacjami symbolu \leq .

1. Udowodnij, że formuła $\forall x \exists y \ x \leq y$ jest prawdziwa w strukturze \mathcal{A} wtedy i tylko wtedy, gdy jest prawdziwa w strukturze \mathcal{B} .
2. Udowodnij, że dla każdej formuły ϕ logiki I rzędu, w której nie występują symbole funkcyjne i \leq jest jedynym symbolem relacyjnym zachodzi równość

$$\mathcal{A} \models \phi \text{ wtedy i tylko wtedy, gdy } \mathcal{B} \models \phi.$$

13.2. Podstawienia

Twierdzenie 193 (o podstawianiu). Dla dowolnych termów s i t i zmiennej x zachodzi

$$(t[x/s])^{\mathfrak{A}}[v] = t^{\mathfrak{A}}[v_x^{s^{\mathfrak{A}}[v]}].$$

Dla dowolnej formuły α , jeśli podstawienie $[x/s]$ jest dopuszczalne w α , to

$$\mathfrak{A} \models (\alpha[x/s])[v] \quad \text{wtw} \quad \mathfrak{A} \models \alpha[v_x^{s^{\mathfrak{A}}[v]}].$$

Fakt 194. Dla dowolnej formuły α , zmiennej x i termu s , jeśli podstawienie $[x/s]$ jest dopuszczalne w α , to formuła $(\forall x.\alpha) \Rightarrow (\alpha[x/s])$ jest tautologią.

13.3. Rezolucja dla rachunku I rzędu

Definicja 195. *Litera*ł w rachunku kwantyfikatorów to formuła atomowa lub negacja formuły atomowej. *Klauzulą* nazywamy alternatywę skończenie wielu literałów. Alternatywę zera literałów nazywamy klauzulą pustą i oznaczamy \perp .

Definicja 196. Jeśli C i D są klauzulami, A i B formułami atomowymi i σ najogólniejszym unifikatorem A i B to klauzulę $\sigma(C \vee D)$ nazywamy *rezolwentą* klauzul $C \vee A$ i $D \vee \neg B$ a klauzulę $\sigma(C \vee A)$ *faktorem* klauzuli $C \vee A \vee B$. Rezolucyjnym dowodem sprzeczności zbioru klauzul \mathcal{F} nazywamy ciąg klauzul C_0, \dots, C_n spełniający warunki

- $C_n = \perp$, oraz
- dla wszystkich $i \in \{0, \dots, n\}$ zachodzi
 - $C_i \in \mathcal{F}$, lub
 - istnieją takie $j, k < i$, że C_i jest rezolwentą C_j i C_k , lub
 - istnieje takie $j < i$, że C_i jest faktorem C_j .

Zadanie 597. Mówimy, że formuła φ logiki I rzędu jest logiczną konsekwencją zbioru formuł \mathcal{F} jeśli w każdej strukturze, w której prawdziwe są wszystkie formuły ze zbioru \mathcal{F} prawdziwa jest również formuła φ .

Udowodnij, że jeśli C i D są klauzulami w logice I rzędu, A i B formułami atomowymi a σ najogólniejszym unifikatorem A i B , to rezolwenta $\sigma(C \vee D)$ jest logiczną konsekwencją klauzul $C \vee A$ i $D \vee \neg B$.

Zadanie 598. Podaj rezolucyjny dowód sprzeczności dla zbioru klauzul

$$\{\neg p(x) \vee \neg p(f(a)) \vee q(y), \quad p(z), \quad \neg p(g(b, u)) \vee \neg q(b)\},$$

gdzie a, b, f, g są symbolami funkcyjnymi, p i q są symbolami relacyjnymi a u, x, y, z są zmiennymi.

Zadania zgłoszone na ćwiczeniach

W poniższej tabeli proszę notować numery zadań przewidzianych na dane zajęcia, numery zgłoszonych zadań i liczbę otrzymanych punktów. Na następnych stronach są wydrukowane kupony zgłoszenia zadań, które należy wyciąć, wypełnić i przekazać prowadzącym na zajęciach. Pierwsze zajęcia nie są punktowane.

Zaj. 2	Data:														
Zadania:															
Punkty:															
														Suma:	
Zaj. 3	Data:														
Zadania:															
Punkty:															
														Suma:	
Zaj. 4	Data:														
Zadania:															
Punkty:															
														Suma:	
Zaj. 5	Data:														
Zadania:															
Punkty:															
														Suma:	

Zaj. 6	Data:																
Zadania:																	
Punkty:																	
																Suma:	
Zaj. 7	Data:																
Zadania:																	
Punkty:																	
																Suma:	
Zaj. 8	Data:																
Zadania:																	
Punkty:																	
																Suma:	
Zaj. 9	Data:																
Zadania:																	
Punkty:																	
																Suma:	
Zaj. 10	Data:																
Zadania:																	
Punkty:																	
																Suma:	

Zaj. 11	Data:														
Zadania:															
Punkty:															

Zaj. 12	Data:													Suma:	
Zadania:															
Punkty:															

Zaj. 13	Data:													Suma:	
Zadania:															
Punkty:															

Zaj. 14	Data:													Suma:	
Zadania:															
Punkty:															

Zaj. 15	Data:													Suma:	
Zadania:															
Punkty:															

Suma:	
-------	--

Kartkówki i inne zdarzenia

Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	

Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	
Dnia:		punkty:	

Ocena końcowa

Liczba punktów zdobytych w semestrze:	
Ocena wyliczona według tablicy C.1:	

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

Logika		Imię i nazwisko:										Sala nr:		
Zadanie:													Data:	
Punkty:													Suma:	

Wypełniać czytelnie i bez skreśleń drukowanymi literami

