

# Logika Matematyczna (2,3)

Jerzy Pogonowski

Zakład Logiki Stosowanej UAM  
[www.logic.amu.edu.pl](http://www.logic.amu.edu.pl)

[pogon@amu.edu.pl](mailto:pogon@amu.edu.pl)

11, 18 X 2007

# Język Klasycznego Rachunku Zdań

W skład **alfabetu** języka KRZ wchodzi:

- **zmienne zdaniowe**:  $p_1, p_2, p_3, \dots$  (zbiór wszystkich tych zmiennych oznaczymy przez  $V_{KRZ}$ )
- **spójniki (prawdziwościowe)**:
  - $\neg$  (negacja),
  - $\wedge$  (koniunkcja),
  - $\vee$  (alternatywa [nierozłączna]),
  - $\rightarrow$  (implikacja [materialna]),
  - $\equiv$  (równoważność [materialna]).
- **symbole pomocnicze**:  $(, )$  — nawias lewy oraz nawias prawy.

To jedna z wielu możliwości wyboru alfabetu. Inna podana została na poprzednim wykładzie (język  $L_{\heartsuit}$ ).

# Język KRZ

Zbiór  $F_{KRZ}$  wszystkich **formuł** języka KRZ definiowany jest indukcyjnie:

- (1) każda zmienna zdaniowa jest formułą
- (2) jeśli  $\alpha \in F_{KRZ}$ , to  $\neg(\alpha)$  jest elementem  $F_{KRZ}$
- (3) jeśli  $\alpha \in F_{KRZ}$  oraz  $\beta \in F_{KRZ}$ , to:  $(\alpha) \wedge (\beta) \in F_{KRZ}$ ,  
 $(\alpha) \vee (\beta) \in F_{KRZ}$ ,  $(\alpha) \rightarrow (\beta) \in F_{KRZ}$ ,  $(\alpha) \equiv (\beta) \in F_{KRZ}$
- (4) każda formuła KRZ jest bądź zmienną zdaniową, bądź powstaje z formuł KRZ poprzez zastosowanie reguły (2) lub reguły (3).

Zwróćmy uwagę, że procedura rozstrzygania, czy dowolny (skończony) ciąg elementów alfabetu języka KRZ jest formułą KRZ jest **efektywna**: w skończonej liczbie kroków (biorących pod uwagę jedynie kształt symboli oraz ich kolejność) daje odpowiedź.

# Język KRZ

Przyjmujemy pewne umowy notacyjne:

- opuszczamy nawiasy otaczające pojedyncze zmienne (np. zamiast  $\neg(p_i)$  piszemy  $\neg p_i$ );
- zmienne zdaniowe zapisujemy zwykle:  $p, q, r, s, t$ ;
- symbole  $\alpha, \beta, \gamma$  oznaczają dowolne formuły języka KRZ;
- symbole  $X, Y, Z$  oznaczają dowolne zbiory formuł języka KRZ.

Na razie będziemy rygorystycznie przestrzegać używania nawiasów. Po nabraniu wprawy wprowadzimy pewne reguły ich opuszczania.

**Uwaga.** O języku KRZ mówimy teraz w pewnym metajęzyku. Podobnie, o semantyce języka KRZ będziemy mówić w metajęzyku.

# Język KRZ

Zauważmy, że zbiór  $F_{KRZ}$  formuł jest uniwersum algebry, której funkcje wyznaczone są przez spójniki prawdziwościowe. Oznaczmy tę algebrę przez:

$$\mathfrak{F} = \langle F_{KRZ}, \neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \equiv \rangle$$

Spójniki można traktować jako operacje na wyrażeniach:

$\wedge : F_{KRZ} \times F_{KRZ} \rightarrow F_{KRZ}$	$\wedge(\alpha, \beta) = (\alpha) \wedge (\beta)$
$\vee : F_{KRZ} \times F_{KRZ} \rightarrow F_{KRZ}$	$\vee(\alpha, \beta) = (\alpha) \vee (\beta)$
$\rightarrow : F_{KRZ} \times F_{KRZ} \rightarrow F_{KRZ}$	$\rightarrow(\alpha, \beta) = (\alpha) \rightarrow (\beta)$
$\equiv : F_{KRZ} \times F_{KRZ} \rightarrow F_{KRZ}$	$\equiv(\alpha, \beta) = (\alpha) \equiv (\beta)$
$\neg : F_{KRZ} \rightarrow F_{KRZ}$	$\neg(\alpha) = \neg(\alpha)$

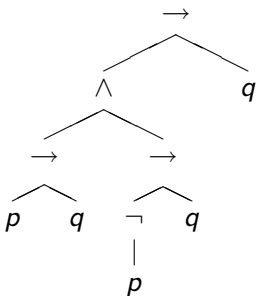
Algebrę  $\mathfrak{F}$  nazywamy **algebrą języka KRZ**.

# Język KRZ

Każdą formułę języka KRZ reprezentować można przez **drzewo**. Jedną z możliwych drzewowych reprezentacji budowy składniowej np. formuły

$$((p \rightarrow q) \wedge (\neg p \rightarrow q)) \rightarrow q$$

wygląda następująco:

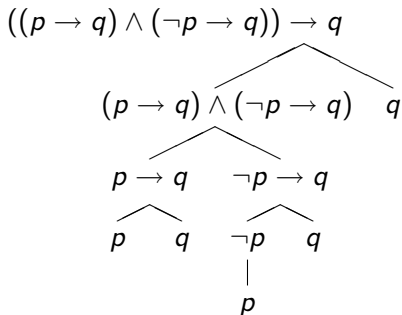


# Język KRZ

Inna z możliwych drzewowych reprezentacji budowy składniowej formuły:

$$((p \rightarrow q) \wedge (\neg p \rightarrow q)) \rightarrow q$$

wygląda następująco:



# Semantyka KRZ

Niech dane będą dwa różne przedmioty: 0 oraz 1. Nieważne, czym one są, istotne jest aby były różne. Pierwszy z nich (tj. 0) możesz nazwać **Fałszem** (albo np. **Ściemą**), drugi (tj. 1) możesz nazwać **Prawdą** (albo np. **Odlotem**). Elementy zbioru  $\{0, 1\}$  nazwiemy **wartościami logicznymi**.

**Wartościowaniem** formuł w KRZ nazywamy każdą funkcję  $h : F_{KRZ} \rightarrow \{0, 1\}$  taką, że:

- $h(\neg(\alpha)) = 1$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $h(\alpha) = 0$
- $h((\alpha) \wedge (\beta)) = 1$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $h(\alpha) = 1$  i  $h(\beta) = 1$
- $h((\alpha) \vee (\beta)) = 0$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $h(\alpha) = 0$  i  $h(\beta) = 0$
- $h((\alpha) \rightarrow (\beta)) = 0$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $h(\alpha) = 1$  i  $h(\beta) = 0$
- $h((\alpha) \equiv (\beta)) = 1$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $h(\alpha) = h(\beta)$ .



# Semantyka KRZ

**Uwaga.** Inna możliwość (którą zaraz przedstawimy) wprowadzenia pojęcia wartościowania jest następująca:

- **wartościowaniem zmiennych zdaniowych** (wzz) nazywamy dowolną funkcję  $h : V_{KRZ} \rightarrow \{0, 1\}$  (a więc dowolny nieskończony ciąg o wyrazach 0 i 1)
- **wartość** formuły przy danym wzz określamy indukcyjnie, korzystając z wybranych funkcji prawdziwościowych skojarzonych ze spójnikami prawdziwościami.

Dowolną funkcję, która każdemu skończonemu ciągowi wartości logicznych przyporządkowuje wartość logiczną nazywamy **funkcją prawdziwościową**.

## Jednoargumentowe funkcje prawdziwościowe

arg	1	2	3	4
0	0	0	1	1
1	0	1	0	1

Pierwsza kolumna tabeli podaje wszystkie wartości argumentu, kolumny o numerach 1–4 podają wartość dla tego argumentu każdej z czterech jednoargumentowych funkcji prawdziwościowych. Funkcja o wartościach z kolumny 3 nazywana jest **Negacją**. Oznaczmy ją symbolem  $Ng$ . Zatem:

$$Ng(0) = 1, \quad Ng(1) = 0.$$

# Dwuargumentowe funkcje prawdziwościowe

$a_1$	$a_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Pierwsze dwie kolumny podają wszystkie układy wartości argumentów, kolumny o numerach 1–16 podają wartość dla tego układu argumentów każdej z szesnastu dwuargumentowych funkcji prawdziwościowych.

# Semantyka KRZ

Wprowadzamy oznaczenia dla niektórych z tych funkcji:

Funkcja o wartościach z kolumny	nazywana jest	i oznaczana
2	<b>Koniunkcją</b>	<i>Kn</i>
8	<b>Alternatywą</b>	<i>Al</i>
14	<b>Implikacją</b>	<i>Im</i>
10	<b>Równoważnością</b>	<i>Rw</i>

**Uwaga.** Nie pogub się: masz **spójniki** prawdziwościowe ( $\neg$ ,  $\wedge$ ,  $\vee$ ,  $\rightarrow$ ,  $\equiv$ ) oraz **funkcje** prawdziwościowe (*Ng*, *Kn*, *Al*, *Im*, *Rw*). Te pierwsze to symbole językowe, te drugie to pewne elementy pozajęzykowe.

# Semantyka KRZ

Zapamiętanie wartości wymienionych funkcji ułatwić powinna poniższa tabelka:

$Kn(x, y) = 1$	wtedy i tylko wtedy, gdy	$x = 1$ oraz $y = 1$
$Al(x, y) = 0$	wtedy i tylko wtedy, gdy	$x = 0$ oraz $y = 0$
$Im(x, y) = 0$	wtedy i tylko wtedy, gdy	$x = 1$ oraz $y = 0$
$Rw(x, y) = 1$	wtedy i tylko wtedy, gdy	$x = y$

**Uwaga.** Można rozważać dowolne  $n$ -argumentowe funkcje prawdziwościowe. Dla prezentacji semantyki KRZ nie jest to jednak potrzebne.

# Semantyka KRZ

Jeśli  $w$  jest wzz, to niech  $w_i$  oznacza  $i$ -ty element ciągu  $w$ .

Funkcja  $Val : (F_{KRZ} \times \{0, 1\}^\omega) \longrightarrow \{0, 1\}$  przyporządkowuje każdej parze  $(\alpha, w)$  złożonej z formuły  $\alpha$  oraz wzz  $w$  jednoznacznie wyznaczoną wartość logiczną, nazywaną **wartością formuły  $\alpha$  przy wzz  $w$** .

Definicja funkcji  $Val$  jest indukcyjna (tzw. **indukcja strukturalna** po budowie formuły  $\alpha$ ):

- $Val(p_i, w) = w_i$ ;
- $Val(\neg(\alpha), w) = Ng(Val(\alpha, w))$ ;
- $Val((\alpha) \wedge (\beta), w) = Kn(Val(\alpha, w), Val(\beta, w))$ ;
- $Val((\alpha) \vee (\beta), w) = Al(Val(\alpha, w), Val(\beta, w))$ ;
- $Val((\alpha) \rightarrow (\beta), w) = Im(Val(\alpha, w), Val(\beta, w))$ ;
- $Val((\alpha) \equiv (\beta), w) = Rw(Val(\alpha, w), Val(\beta, w))$ .

# Semantyka KRZ

Mamy zatem wzajemnie jednoznaczność między spójnikami prawdziwościami oraz funkcjami prawdziwościami. Często spotykamy w podręcznikach uproszczone tabelki, wiążące wartości logiczne bezpośrednio ze spójnikami (w pierwszej kolumnie wartość pierwszego argumentu, w pierwszym wierszu — wartość drugiego, na przecięciu wiersza i kolumny — wartość formuły dla danych argumentów):

$\wedge$	0	1
0	0	0
1	0	1

$\vee$	0	1
0	0	1
1	1	1

$\rightarrow$	0	1
0	1	1
1	0	1

$\equiv$	0	1
0	1	0
1	0	1

$\neg$	
0	1
1	0

# Semantyka KRZ

Powinno być jasne, że każda funkcja jednoargumentowa postaci  $Val( \cdot, w ) : F_{KRZ} \rightarrow \{0, 1\}$  dla pewnego wzz  $w$  jest wartościowaniem formuł języka KRZ.

Niech funkcja  $\pi : F_{KRZ} \times \{0, 1\} \rightarrow F_{KRZ}$  będzie określona warunkiem:  $\pi(\alpha, w) = \alpha$  dla dowolnej formuły  $\alpha$  oraz wzz  $w$ .

Każde wartościowanie  $h$  formuł języka KRZ można jednoznacznie przedstawić w postaci:

$$h(\pi(\alpha, w)) = Val(\alpha, w).$$

Mamy zatem wzajemnie jednoznaczną odpowiedniość między obydwojma sposobami wprowadzania pojęcia wartościowania formuł języka KRZ. Możemy posługiwać się każdym z nich, co też będziemy czynić.



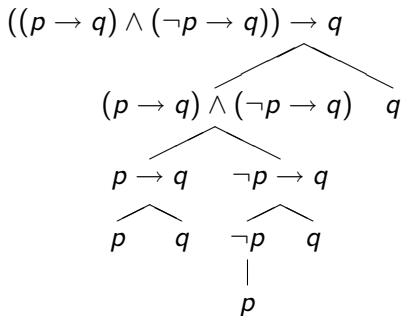
# Semantyka KRZ

Wartość formuły przy danym wzz zależy tylko od skończonej liczby elementów tego wzz (bo każda formuła zawiera jedynie skończoną liczbę zmiennych). Ustalanie wartości formuły przy danym wzz jest procedurą **obliczalną**: dla dowolnej formuły oraz wzz można w skończonej liczbie prostych, mechanicznych kroków (jawnie opisanych w podanych wyżej tabelkach) ustalić wartość tej formuły przy tym wzz. Przy tym, jeśli formuła  $\alpha$  zawiera  $n$  zmiennych zdaniowych, to przy ustalaniu jej wartości wystarczy brać pod uwagę najwyżej  $2^n$  wzz.

Przypomnij sobie drzewową reprezentację budowy składniowej formuł: każde wzz umieszcza 0 oraz 1 na liściach drzewa, a funkcje prawdziwościowe pozwalają w sposób jednoznaczny wyznaczyć wartość każdego wężła na podstawie wartości jego bezpośrednich potomków. I tak aż do przypisania wartości korzeniowi drzewa.

# Demokratyczne Upoważnienie Poprzez Aplauz

Przypomnijmy jedną z możliwych drzewowych reprezentacji budowy składniowej formuły  $((p \rightarrow q) \wedge (\neg p \rightarrow q)) \rightarrow q$



Jakkolwiek rozmieścimy 0 oraz 1 na liściach drzewa, to wartość korzenia będzie równa 1, gdy wartości poszczególnych węzłów obliczać będziemy korzystając z tablic dla funkcji prawdziwościowych. Formuły o tej własności nazwiemy tautologiami KRZ.

# Semantyka KRZ: pojęcie tautologii KRZ

**Tautologią KRZ** nazywamy każdą formułę języka KRZ, która przy każdym wartościowaniu przyjmuje wartość 1.

Tak więc, formuła  $\alpha$  **jest** tautologią KRZ, gdy dla każdego wartościowania  $h$ , mamy:  $h(\alpha) = 1$ .

Formuła  $\alpha$  **nie jest** tautologią KRZ, gdy istnieje wartościowanie  $h$  takie, że  $h(\alpha) = 0$ .

**Uwaga.** Badamy nie konkretne formuły, lecz raczej **schematy** formuł. Dla przykładu,  $(\alpha) \vee (\neg(\alpha))$  jest schematem tautologii KRZ dla dowolnej formuły  $\alpha$ , zaś np.  $(\alpha) \rightarrow ((\alpha) \wedge (\beta))$  nie jest schematem tautologii KRZ — bo np. szczególny przypadek tego schematu:  $p_1 \rightarrow (p_1 \wedge p_2)$  nie przy każdym wartościowaniu przyjmuje wartość 1. W dalszym ciągu będziemy używać terminu „tautologia KRZ” zarówno dla poszczególnych formuł języka KRZ, jak i dla schematów formuł.

# Semantyka KRZ: pojęcie tautologii KRZ

Tautologiami KRZ są zatem dokładnie te formuły  $\alpha$ , dla których  $Val(\alpha, w) = 1$  dla każdego wzz  $w$ .

Formuła  $\alpha$  nie jest tautologią KRZ, gdy istnieje co najmniej jedno wzz  $w$  takie, że  $Val(\alpha, w) = 0$ .

Rozważmy macierz logiczną  $\mathfrak{B}_2 = \langle \{0, 1\}, Ng, Kn, Al, Im, Rw, \{1\} \rangle$  z uniwersum złożonym z wartości logicznych i z jednoelementowym zbiorem  $\{1\}$  wartości wyróżnionych. Przypomnijmy, że  $\mathfrak{F} = \langle F_{KRZ}, \neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \equiv \rangle$  jest algebrą formuł języka KRZ.

Tautologiami KRZ są dokładnie te formuły  $\alpha$ , które przy każdym homomorfizmie  $h : \mathfrak{F} \rightarrow \mathfrak{B}_2$  przyjmują wartość wyróżnioną w macierzy  $\mathfrak{B}_2$ , tj. dla których zachodzi  $h(\alpha) = 1$ .

# Semantyka KRZ: pojęcie tautologii KRZ

Zauważmy, że tautologie KRZ są dokładnie tymi formułami języka KRZ, które przyjmują wartość wyróżnioną przy każdym wartościowaniu jedynie przez wzgląd na swoją **budowę składniową** oraz wprzód ustalone znaczenie **stałych logicznych** języka KRZ (tj. spójników prawdziwościowych). Gdy dokonujemy „przekładu”, tj. podstawiamy konkretne zdania za zmienne zdaniowe, wynik takiego podstawienia w tautologii jest zawsze zdaniem **prawdziwym**, niezależnie od **treści** podstawianych zdań.

Formuły, które przy każdym wartościowaniu przyjmują wartość 0 nazywamy **kontrtautologiami** KRZ.

Formuła  $\alpha$  **nie jest** zatem kontrtautologią KRZ, gdy przy co najmniej jednym wartościowaniu  $h$  mamy:  $h(\alpha) = 1$ .

Wszystkie formuły języka KRZ podzielić można na trzy klasy:

- tautologie KRZ
- kontrtautologie KRZ
- pozostałe formuły (nie będące ani tautologiami, ani kontrtautologiami).

## Semantyka KRZ: wynikanie logiczne w KRZ

Wynikanie logiczne to relacja między zbiorami formuł. Powiemy, że zbiór  $Y$  **wynika logicznie** (w KRZ) ze zbioru  $X$ , gdy przy każdym wartościowaniu, przy którym wszystkie formuły zbioru  $X$  mają wartość 1, również wszystkie formuły zbioru  $Y$  mają wartość 1.

Zbiór  $Y$  **nie** wynika logicznie ze zbioru  $X$ , gdy istnieje co najmniej jedno wartościowanie, przy którym wszystkie formuły z  $X$  mają wartość 1, a pewna formuła ze zbioru  $Y$  ma wartość 0.

Gdy  $Y$  wynika logicznie z  $X$ , to piszemy  $X \models_{KRZ} Y$ , a gdy  $Y$  jest zbiorem jednoelementowym  $\{\alpha\}$ , to piszemy  $X \models_{KRZ} \alpha$  (mówimy wtedy krótko, że formuła  $\alpha$  wynika logicznie ze zbioru  $X$ ).

Tautologie KRZ to dokładnie te formuły, które wynikają logicznie ze zbioru pustego  $\emptyset$ .

# Semantyka KRZ: wynikanie logiczne w KRZ

Ze względów typograficznych będziemy czasem pomijać indeks KRZ w symbolu dla wynikania logicznego. Gdy  $Y$  nie wynika logicznie z  $X$ , to piszemy  $X \not\models Y$ . Oto niektóre własności relacji  $\models$ :

- $\models$  jest zwrotna:  $X \models X$  dla każdego  $X$
- $\models$  jest przechodnia: jeśli  $X \models Y$  oraz  $Y \models Z$ , to  $X \models Z$ , dla wszystkich  $X, Y, Z$
- $\models$  jest monotoniczna względem pierwszego argumentu: jeśli  $X \models Y$  oraz  $X \subseteq Z$ , to  $Z \models Y$
- $\models$  jest antymonotoniczna względem drugiego argumentu: jeśli  $X \models Y$  oraz  $Z \subseteq Y$ , to  $X \models Z$
- $\emptyset \models \alpha$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $\alpha$  jest tautologią KRZ.

# Semantyka KRZ: semantyczna niesprzeczność

Mówimy, że zbiór  $X$  formuł języka KRZ jest:

- **semantycznie niesprzeczny**, gdy istnieje wartościowanie  $h$  takie, że  $h(\alpha) = 1$  dla wszystkich  $\alpha \in X$ ;
- **semantycznie sprzeczny**, gdy  $X$  nie jest semantycznie niesprzeczny.

Z powyższej definicji wynika, że  $X$  jest semantycznie sprzeczny, gdy dla każdego wartościowania  $h$  oraz dla wszystkich  $\alpha \in X$  mamy:  $h(\alpha) = 0$ .

Aby pokazać, że  $X$  jest semantycznie niesprzeczny wystarczy znaleźć **jedno** wartościowanie  $h$  takie, że dla wszystkich  $\alpha \in X$  mamy:  $h(\alpha) = 1$ .

Aby pokazać, że  $X$  jest semantycznie sprzeczny trzeba pokazać, że dla **żadnego** wartościowania  $h$  **nie zachodzi**  $h(\alpha) = 1$  dla wszystkich  $\alpha \in X$ .



## Dygresja: wnioskowania

Wnioskowania przeprowadzamy w językach etnicznych. **Wnioskowaniem** (np. w języku polskim) nazywamy dowolny układ złożony ze zbioru zdań (**przesłanek**) oraz zdania (**wniosku**).

Między przesłankami oraz wnioskiem mogą zachodzić różne zależności: syntaktyczne, semantyczne oraz pragmatyczne. W zastosowaniach Elementarza Logicznego bada się tzw. **wnioskowania dedukcyjne**, tj. takie, w których budowa składniowa użytych w nich zdań przesądza o tym, że jeśli przesłanki są prawdziwe, to także wniosek jest prawdziwy.

We wnioskowaniach dedukcyjnych związek między przesłankami oraz wnioskiem oparty jest na wynikaniu logicznym. Za chwilę podamy precyzyjną definicję wnioskowań dedukcyjnych.

# Semantyka KRZ: pojęcie reguły niezawodnej

**Regułą** (regułą wnioskowania) nazywamy dowolną relację  $R \subseteq 2^{F_{KRZ}} \times F_{KRZ}$ , której poprzedniki są skończonymi zbiorami formuł.

Każdy układ postaci  $(X, \alpha) \in R$  nazywamy **sekwentem** reguły  $R$ .

Poprzedniki relacji  $R$  nazywamy **przesłankami reguły**  $R$ , a następniki **wnioskami reguły**  $R$ .

Reguła  $R$  jest **niezawodna**, gdy dla każdego  $(X, \alpha) \in R$  zachodzi:  $X \models \alpha$ , czyli gdy  $\alpha$  wynika logicznie z  $X$ .

W przeciwnym przypadku  $R$  jest **zawodna**.

# Semantyka KRZ: pojęcie reguły niezawodnej

Z powyższej definicji widać, że reguła  $R$  jest:

- niezawodna wtedy i tylko wtedy, gdy dla dowolnego jej sekwentu  $(X, \alpha) \in R$  oraz każdego wartościowania, przy którym wszystkie elementy  $X$  (tj. przesłanki) mają wartość 1, także  $\alpha$  (tj. wniosek) ma wartość 1;
- zawodna, wtedy i tylko wtedy, gdy istnieją: co najmniej jedno wartościowanie oraz co najmniej jeden sekwent  $(X, \alpha) \in R$  przy którym wszystkie elementy  $X$  mają wartość 1, a  $\alpha$  ma wartość 0.

**Uwaga.** Reguły wnioskowania interesujące z logicznego punktu widzenia opisywane są zwięźle przez podanie kształtu wszystkich sekwentów składających się na regułę, np. tak, jak w poniższych przykładach:

# Semantyka KRZ: przykłady reguł niezawodnych

Oto schematyczne zapisy kilku ważnych niezawodnych reguł wnioskowania (zapis poniższy wskazuje kształt wszystkich sekwentów poszczególnych reguł):

$$(r1) \quad (\{\alpha \rightarrow \beta, \alpha\}, \beta)$$

$$(r2) \quad (\{\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\}, \neg\alpha)$$

$$(r3) \quad (\{\alpha \rightarrow \beta, \beta \rightarrow \gamma\}, \alpha \rightarrow \gamma)$$

$$(r4) \quad (\{\alpha, \neg\alpha\}, \beta)$$

$$(r5) \quad (\{\alpha \vee \beta, \neg\alpha\}, \beta)$$

$$(r6) \quad (\{\alpha \rightarrow \beta, \beta \rightarrow \alpha\}, \alpha \equiv \beta)$$

$$(r7) \quad (\{\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma)\}, (\alpha \wedge \beta) \rightarrow \gamma)$$

$$(r8) \quad (\{(\alpha \wedge \beta) \rightarrow \gamma\}, \alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma))$$

Regułę wnioskowania o przesłankach  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  oraz wniosku  $\beta$  zapisujemy

$$\alpha_1$$

$$\vdots$$

$$\alpha_n$$

$$\hline \beta$$

często w postaci:  $\frac{\alpha_1, \dots, \alpha_n}{\beta}$ , albo w postaci:

## Reguły zachowujące tautologiczność

Reguła  $R$  zachowuje własność bycia tautologią wtedy i tylko wtedy, gdy: dla każdego  $(X, \alpha) \in R$ , jeśli wszystkie elementy zbioru  $X$  są tautologiami, to także  $\alpha$  jest tautologią.

**Twierdzenie 2.1.** Każda reguła niezawodna zachowuje własność bycia tautologią.

**Dowód.** Niech  $R$  będzie niezawodna i przypuśćmy, że nie zachowuje ona własności bycia tautologią. Istnieje zatem sekwent  $(X, \alpha) \in R$  taki, że  $X$  jest zbiorem tautologii, a  $\alpha$  nie jest tautologią. Istnieje więc wartościowanie  $h$  takie, że  $h(\alpha) = 0$ . Oczywiście  $h(\beta) = 1$  dla każdej formuły  $\beta$  z  $X$ . Zatem  $X \not\models \alpha$ , a to jest sprzeczne z niezawodnością  $R$ . Zachodzi więc teza twierdzenia.

**Ćwiczenie.** Udowodnij, że reguły (r1)-(r8) są niezawodne.

## Dygresja: wnioskowania dedukcyjne

**Spójniki logiczne** w danym języku etnicznym (tu: polskim) to wyrażenia: *i*, *lub*, *jeśli...*, *to...*, *nieprawda*, *że*, itp.

**Zdaniem prostym** (języka etnicznego) nazywamy każde zdanie  $A$  takie, że:

- żadna część  $A$  nie jest zdaniem
- $A$  jest zdaniem w sensie logicznym, tj. może być prawdziwe lub fałszywe.

**Zdania złożone** to zdania, które nie są proste. Bierzemy pod uwagę tylko złożenia zdań z użyciem spójników logicznych.

**Schematem** zdania  $A$  nazywamy formułę języka KRZ otrzymaną z  $A$  poprzez zastąpienie zdań prostych zmiennymi zdaniowymi, a wyrażań reprezentujących spójniki logiczne spójnikami prawdziwościowymi.

## Dygresja: wnioskowania dedukcyjne

**Schematem wnioskowania** złożonego ze zbioru przesłanek  $\mathcal{A}$  oraz wniosku  $A$  nazywamy układ  $(X, \alpha)$ , gdzie:

- $X$  jest zbiorem schematów zdań z  $\mathcal{A}$
- $\alpha$  jest schematem  $A$ .

Wnioskowanie  $(\mathcal{A}, A)$  nazywamy **dedukcyjnym**, jeśli jego schemat jest sekwentem reguły niezawodnej.

Wnioskowanie jest zatem dedukcyjne, gdy schemat jego wniosku wynika logicznie ze zbioru schematów jego przesłanek.

**Uwaga.** Pamiętaj: wnioskowania przeprowadzamy w językach etnicznych, schematy wnioskowań i reguły to konstrukcje z języka KRZ.

## Dygresja: teksty semantycznie niesprzeczne

Mówimy, że zbiór  $\mathcal{A}$  zdań języka etnicznego jest **semantycznie niesprzeczny**, gdy zbiór schematów wszystkich zdań  $\mathcal{A}$  jest semantycznie niesprzecznym zbiorem formuł języka KRZ.

Mówimy, że zbiór  $\mathcal{A}$  zdań języka etnicznego jest **semantycznie sprzeczny**, gdy zbiór schematów wszystkich zdań  $\mathcal{A}$  jest semantycznie sprzecznym zbiorem formuł języka KRZ.

Mówimy, że zdanie  $A$  języka etnicznego jest **prawdą logiczną**, gdy schemat  $A$  jest tautologią KRZ.

Mówimy, że zdanie  $A$  języka etnicznego jest **fałszem logicznym**, gdy schemat  $A$  jest kontrtautologią KRZ.



# Semantyka KRZ: twierdzenia o dedukcji

## 2.2. Twierdzenie o dedukcji wprost (wersja semantyczna).

Dla dowolnych  $X \subseteq F_{KRZ}$ ,  $\alpha \in F_{KRZ}$ ,  $\beta \in F_{KRZ}$  zachodzą następujące implikacje:

- Jeśli  $X \cup \{\alpha\} \models_{KRZ} \beta$ , to  $X \models_{KRZ} \alpha \rightarrow \beta$ .
- Jeśli  $X \models_{KRZ} \alpha \rightarrow \beta$ , to  $X \cup \{\alpha\} \models_{KRZ} \beta$ .

Na mocy powyższego twierdzenia (oraz praw eksportacji i importacji) reguła  $\frac{\alpha_1, \dots, \alpha_n}{\beta}$  jest niezawodna wtedy i tylko wtedy, gdy implikacja  $(\alpha_1 \wedge \dots \wedge \alpha_n) \rightarrow \beta$  jest tautologią KRZ.

Prawo importacji:  $(\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma)) \rightarrow ((\alpha \wedge \beta) \rightarrow \gamma)$

Prawo eksportacji:  $((\alpha \wedge \beta) \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma))$

Ćwiczenie: pokaż, że te prawa są tautologiami KRZ.

# Semantyka KRZ: twierdzenia o dedukcji

## 2.3. Twierdzenie o dedukcji nie wprost (wersja semantyczna).

Dla dowolnych  $X \subseteq F_{KRZ}$ ,  $\alpha \in F_{KRZ}$ ,  $\beta \in F_{KRZ}$  zachodzą następujące równoważności:

- $X \cup \{\alpha\} \models_{KRZ} \{\beta, \neg\beta\}$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $X \models_{KRZ} \neg\alpha$ .
- $X \cup \{\neg\alpha\} \models_{KRZ} \{\beta, \neg\beta\}$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $X \models_{KRZ} \alpha$ .

Z twierdzenia o dedukcji nie wprost korzystamy przeprowadzając dowody nie wprost (dowody **apagogeniczne**).

Dowody obu semantycznych twierdzeń o dedukcji przedstawiono w Dodatku 1.

**Ćwiczenie.** Wykorzystaj twierdzenie o dedukcji wprost dla uzyskania z reguł (r1)-(r8) odpowiednich tautologii KRZ.