

Лекции по Математической логике 4 семестр

Пуга Yaroshevskiy

2 апреля 2021 г.

Оглавление

1	TODO	2
2	TODO	3
3	TODO	4
4		5
4.1	Табличные модели	5
4.2	Модели Крипке	6
4.3	Доказательство нетабличности	7
5		9
5.1	Программы	9
5.1.1	Исчисление предикатов	11
5.1.2	Теория моделей	11
5.1.3	Теория доказательств	13
6		14
6.1	Исчисление предикатов	14
6.1.1	Расставление скобок	14
6.1.2	Вхождение	15
6.1.3	Свободные подстановки	15
6.1.4	Пример доказательства	16
6.1.5	Теорема о дедукции	16
7		17
7.1	Полнота исчисления предикатов	17

Лекция 1

TODO

Лекция 2

TODO

Лекция 3

TODO

Лекция 4

Определение. Предпорядок — транзитивное, рефлексивное

Определение. Отношение порядка (частичный) — антисимметричное, транзитивное, рефлексивное

Определение. Линейный порядок — порядок в котором $a \preceq b$ или $b \preceq a$

Определение. Полный порядок — линейный, каждое подмножество имеет наименьший элемент.

Пример. \mathbb{N} — вполне упорядоченное множество

Пример. \mathbb{R} — не вполне упорядоченное множество

- $(0, 1)$ не имеет наименьшего
- \mathbb{R} не имеет наименьшего

4.1 Табличные модели

Определение. Назовем модель **табличной** для ИИВ:

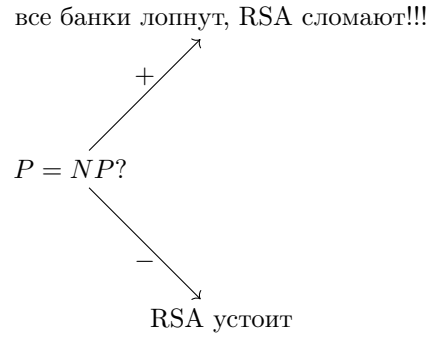
- V — множество истинностных значений
 $f_{\rightarrow}, f_{\&}, f_V : V^2 \rightarrow V, f_{\neg} : V \rightarrow V$
Выделенные значения $T \in V$
 $\vdash i \in V, f_p : p_i \rightarrow V$
- $p_i = f_p(p_i)$
 $\llbracket \alpha \star \beta \rrbracket = f_{\star}(\llbracket \alpha \rrbracket, \llbracket \beta \rrbracket)$
 $\llbracket \neg \alpha \rrbracket = f_{\neg}(\llbracket \alpha \rrbracket)$

Если $\vdash \alpha$, то $\vdash \alpha$ означает, что $\llbracket \alpha \rrbracket = T$, при любой f_p

Определение. Конечная модель: модель где V — конечно

Теорема 4.1.1. У ИИВ не существует полной табличной модели

4.2 Модели Крипке



1. $W = \{W_i\}$ — множество миров
2. частичный порядок (\preceq)
3. отношение вынужденности: $W_j \Vdash p_i$
 $(\Vdash) \subseteq W \times \mathcal{P}$
 При этом, если $W_j \Vdash p_i$ и $W_j \preceq W_k$, то $W_k \Vdash p_i$

Определение.

1. $W_i \Vdash \alpha$ и $W_i \Vdash \beta$, тогда (и только тогда) $W_i \Vdash \alpha \& \beta$
2. $W_i \Vdash \alpha$ или $W_i \Vdash \beta$, то $W_i \Vdash \alpha \vee \beta$
3. Пусть во всех $W_i \preceq W_j$ всегда когда $W_j \Vdash \alpha$ имеет место $W_j \Vdash \beta$
 Тогда $W_i \Vdash \alpha \rightarrow \beta$
4. $W_i \Vdash \neg \alpha$ — α не вынуждено нигде, начиная с W_i : $W_i \preceq W_j$, то $W_j \nVdash \alpha$

Теорема 4.2.1. Если $W_i \Vdash \alpha$ и $W_i \preceq W_j$, то $W_j \Vdash \alpha$

Определение. Если $W_i \Vdash \alpha$ при всех $W_i \in W$, то $\models \alpha$

Теорема 4.2.2. ИИВ корректна в модели Крипке

Доказательство. 1. $\langle W, \Omega \rangle$ — топология, где $\Omega = \{w \subseteq W \mid \text{если } W_i \in w, W_i \preceq W_j, \text{ то } W_j \in w\}$

2. $\{W_k \mid W_k \Vdash p_j\}$ — открытое множество
 Примем $\llbracket p_j \rrbracket = \{W_k \mid W_k \Vdash p_j\}$
 Аналогично $\llbracket \alpha \rrbracket = \{W_k \mid W_k \Vdash \alpha\}$

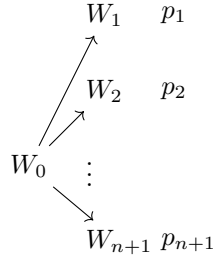
□

4.3 Доказательство нетабличности

Пусть существует конечная табличная модель $|V| = n$

$$\varphi_n = \bigvee_{\substack{1 \leq i, j \leq n+1 \\ i \neq j}} (p_i \rightarrow p_j \& p_j \rightarrow p_i)$$

1. $\not\models \varphi$



$$W_1 \not\models (p_i \rightarrow p_k) \& (p_k \rightarrow p_1), \quad k \neq 1$$

Значит

$$\begin{aligned} & \not\models (p_i \rightarrow p_j) \& (p_j \rightarrow p_i) \\ & \not\models \bigvee (p_i \rightarrow p_j) \& (p_j \rightarrow p_i) \\ & \not\models \varphi_n \end{aligned}$$

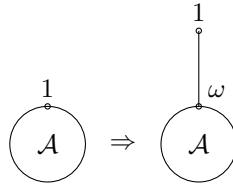
2. $\models_V \varphi_n$: по признаку Дирихле найдутся $i \neq j : \llbracket p_i \rrbracket = \llbracket p_j \rrbracket$
 $\llbracket p_i \rightarrow p_j \rrbracket = \text{И}$ и $\llbracket \varphi_n \rrbracket = \text{И}$
 Значит $\vdash \varphi_n$ — противоречие

Определение. Дизъюнктивность ИИВ: $\vdash \alpha \vee \beta$ влечет $\vdash \alpha$ или $\vdash \beta$

Определение. Гёделева алгебра — алгебра Гейтинга, такая что из $\alpha + \beta = 1$ следует что $\alpha = 1$ или $\beta = 1$

Определение. Пусть \mathcal{A} — алгебра Гейтинга, тогда:

1. $\Gamma(\mathcal{A})$



Добавим новый элемент $1_{\Gamma(\mathcal{A})}$ переименуем $1_{\mathcal{A}}$ в ω

Теорема 4.3.1.

- $\Gamma(\mathcal{A})$ — алгебра Гейтинга
- $\Gamma(\mathcal{A})$ — Геделева

Определение. Гомоморфизм алгебр Гейтинга

- $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$
- $\varphi(a \star b) = \varphi(a) \star \varphi(b)$
- $\varphi(1_{\mathcal{A}}) = 1_{\mathcal{B}}$
- $\varphi(0_{\mathcal{A}}) = 0_{\mathcal{B}}$

Теорема 4.3.2. $a \leq b$, то $\varphi(a) \leq \varphi(b)$

Определение.

- α — формула ИИВ
- f, g : оценки ИИВ
- f : ИИВ $\rightarrow \mathcal{A}$
- g : ИИВ $\rightarrow \mathcal{B}$

φ согласованы f, g , если $\varphi(f(\alpha)) = g(\alpha)$

Теорема 4.3.3. если $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ согласована с f, g и оценка $\llbracket \alpha \rrbracket_g \neq 1_{\mathcal{B}}$, то $\llbracket \alpha \rrbracket_f \neq 1_{\mathcal{A}}$

Теорема 4.3.4. ИИВ дизъюнктивно

Доказательство. Рассмотрим алгебру Линденбаума: \mathcal{L}
Рассмотрим $\Gamma(\mathcal{L})$

- $\varphi : \Gamma(\mathcal{L}) \rightarrow \mathcal{L}$

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1_{\mathcal{L}} & , x = \omega \\ x & , \text{иначе} \end{cases}$$

φ — гомоморфизм

Пусть $\vdash \alpha \vee \beta$, тогда $\llbracket \alpha \vee \beta \rrbracket_{\Gamma(\mathcal{L})} = 1_{\Gamma(\mathcal{L})}$

$\llbracket \alpha + \beta \rrbracket = 1$, и т.к. $\Gamma(\mathcal{L})$ — Геделева то $\llbracket \alpha \rrbracket = 1$ или $\llbracket \beta \rrbracket = 1$

Пусть $\not\vdash \alpha$ и $\not\vdash \beta$, тогда $\varphi(\llbracket \alpha \rrbracket) \neq 1_{\mathcal{L}}$ и $\varphi(\llbracket \beta \rrbracket) \neq 1_{\mathcal{L}}$, т.е. $\llbracket \alpha \rrbracket_{\mathcal{L}} \neq 1_{\mathcal{L}}$ и $\llbracket \beta \rrbracket_{\mathcal{L}} \neq 1_{\mathcal{L}}$, тогда $\llbracket \alpha \rrbracket_{\Gamma(\mathcal{L})} \neq 1_{\Gamma(\mathcal{L})}$ и $\llbracket \beta \rrbracket_{\Gamma(\mathcal{L})} \neq 1_{\Gamma(\mathcal{L})} \Rightarrow$ Противоречие \square

Лекция 5

5.1 Программы

программа(функция)

- $P : \alpha \rightarrow \beta$ — берет α , возвращает β
- P — доказательство, что из α следует β

Пример.

```
1 f a = a
```

$f : A \rightarrow A$ — f доказывает что, из A следует A

логическое исчисление	Типизированное λ -исчисление
логическая формула	тип
доказательство	значение
доказуемая формула	обитаемый тип(имеет хотя бы один экземпляр)
\rightarrow	функция
$\&$	упорядоченная пара
\vee	алг. тип(тип-сумма)

Пример. 5 доказывает Int

Пример. Список:

```
1 Type list = Record
2   Nul: boolean;
3   case Nul of
4     True  : ;
5     False : Next: ^list;
6 end;
```

```

1 struct list {
2     *list next;
3 };

```

Если `next == NULL` — то конец

Пример. Дерево:

```

1 struct tree {
2     tree* left;
3     tree* right;
4     int value;
5 };

```

Определение. Отмеченное(дизъюнктное) объединение множеств:

- A, B — множества
- $A \sqcup B = \{ \langle "A", a \rangle \mid a \in A \} \cup \{ \langle "B", a \rangle \mid a \in B \}$

Пусть $S \in A \sqcup B$. Мы знаем откуда S

```

1 data List a = Nil | Cons a (List a)
2 example = Cons 1 (Cons 2 (Cons 3 Nil)) -- [1; 2; 3]

```

```

1 union {
2     int a;
3     char b;
4 };

```

Пример.

$$\frac{\Gamma \vdash \overset{\text{Nil}}{\alpha} \rightarrow \gamma \quad \Gamma \vdash \overset{\text{Cons}}{\beta} \rightarrow \gamma \quad \vdash \alpha \vee \beta}{\Gamma \vdash \underset{\text{int}}{\gamma}}$$

```

1 let rec count l (* α + β *) =
2 match l with
3   | Nil (* α *) -> 0 (* α → int *)
4   | Cons(hd, tl) (* β *) -> 1 + count tl (* β → int *)

```

5.1.1 Исчисление предикатов

Определение. Язык исчисления предикатов

- логические выражения "предикаты"/"формулы"
- предметные выражения "термы"

Θ — метапеременные для термов

Термы:

- Атомы:
 - a, b, c, d, \dots — предметные переменные
 - x, y, z — метапеременные для предметных переменных
- Функциональные Символы
 - f, g, h — Функциональные символы (метапеременные)
 - $f(\Theta_1, \dots, \Theta_n)$ — применение функциональных символов
- Логические выражения:

Если $n = 0$, будем писать f, g — без скобок

 - P — метапеременные для предикатных символов
 - A, B, C — предикатный символ
 - $P(\Theta_1, \dots, \Theta_n)$ — применение предикатных символов
 - $\&, \vee, \neg, \rightarrow$ — Связки
 - $\forall x.\varphi$ и $\exists x.\varphi$ — кванторы
 - «квантор» <переменная>.<выражение>

1. Сокращение записи И.В + жадность \forall, \exists

Метавыражение:

$$\forall x.(P(x) \& (\forall y.P(y)))$$

Квантор съедает все что дают, т.е. имеет минимальный приоритет.

Правильный вариант (настоящее выражение):

$$\forall a.B(A) \& \forall b.B(b)$$

5.1.2 Теория моделей

Оценка формулы в исчислении предикатов:

1. Фиксируем D — предметное множество
2. Каждому $f_i(x_1, \dots, x_n)$ сопоставим функцию $D^n \rightarrow D$

3. Каждому $P_j(x_1, \dots, x_m)$ сопоставим функцию(предикат) $D^2 \rightarrow V$

4. Каждой x_i сопоставим элемент из D

Пример.

$$\forall x. \forall y. E(x, y)$$

Чтобы определить формулу сначала определим $D = \mathbb{N}$

$$E(x, y) = \begin{cases} \text{И} & , x = y \\ \text{Л} & , x \neq y \end{cases}$$

- $\llbracket x \rrbracket = f_{x_i}$
- $\llbracket \alpha \star \beta \rrbracket$ — смотри ИИВ
- $\llbracket P_i(\Theta_1, \dots, \Theta_n) \rrbracket = f_{P_i}(\llbracket \Theta_1 \rrbracket, \dots, \llbracket \Theta_n \rrbracket)$
- $\llbracket f_j(\Theta_1, \dots, \Theta_n) \rrbracket = f_{f_j}(\llbracket \Theta_1 \rrbracket, \dots, \llbracket \Theta_n \rrbracket)$

•

$$\llbracket \forall x. \varphi \rrbracket = \begin{cases} \text{И} & , \text{если } \llbracket \varphi \rrbracket^{f_x=k} = \text{И} \text{ при всех } k \in D \\ \text{Л} & , \text{иначе} \end{cases}$$

•

$$\llbracket \exists x. \varphi \rrbracket = \begin{cases} \text{И} & , \text{если } \llbracket \varphi \rrbracket^{f_x=k} = \text{И} \text{ при некотором } k \in D \\ \text{Л} & , \text{иначе} \end{cases}$$

$$\llbracket \forall x. \forall y. E(x, y) \rrbracket = \text{Л}$$

$$\text{т.к. } \llbracket E(x, y) \rrbracket^{x:=1, y:=2} = \text{Л}$$

Пример.

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \forall n > N \quad |a_n - a| < \varepsilon$$

Синим отмечены функциональные конструкции(термы), зеленым предикатные

$$\forall \varepsilon. (\varepsilon > 0) \rightarrow \exists N. \forall n. (n > N) \rightarrow (|a_n - a| < \varepsilon)$$

Обозначим:

- $(>)(a, b) = G(a, b)$ — предикат
- $|\bullet|(a) = m_1(a)$
- $(-)(a, b) = m_-(a, b)$
- $0() = m_0$
- $a_\bullet(n) = m_a(n)$

$$\forall e. G(e, m_0) \rightarrow \exists n_0. \forall n. G(n, n_0) \rightarrow G\left(e, m_1\left(m_-(m_a(n), a)\right)\right)$$

5.1.3 Теория доказательств

Все аксиомы И.В + М.Р.

(схема 11) $(\forall x.\varphi) \rightarrow \varphi[x := \Theta]$

(схема 12) $\varphi[x := \Theta] \rightarrow \exists x.\varphi$

Если Θ свободен для подстановки вместо x в φ .

Определение. Свободен для подстановки — никакое свободное вхождение x в Θ не станет связанным

Пример.

```

1  int y;
2  int f(int x) {
3      x = y;
4  }
```

Заменяем $y := x$. Код сломается, т.к. у нас нет свобод для подстановки

(Правило \forall)

$$\frac{\varphi \rightarrow \psi}{\varphi \rightarrow \forall x.\psi}$$

(Правило \exists)

$$\frac{\psi \rightarrow \varphi}{\exists x.\psi \rightarrow \varphi}$$

В обоих правилах x не входит свободно в φ

Пример.

$$\frac{x = 5 \rightarrow x^2 = 25}{x = 5 \rightarrow \forall x.x^2 = 25}$$

Между x и x^2 была связь, мы ее разрушили. Нарушено ограничение

Пример.

$$\exists y.x = y$$

$$\forall x.\exists y.x = y \rightarrow \exists y.y + 1 = y$$

Делаем замену $x := y+1$. Нарушено требование свобод для подстановки. y входит в область действия квантора \exists и поэтому свободная переменная x стала связанная.

Лекция 6

6.1 Исчисление предикатов

6.1.1 Расставление скобок

Кванторы имеют наименьший приоритет

Пример.

$$\begin{aligned} & \forall x.A \& B \& y.C \& D \vee \exists z.E \\ & (\forall x.(A \& B \& \forall y.(C \& D \vee \exists z.(E)))) \end{aligned}$$

Еще раз про правила только со скобками

1.

$$\frac{\varphi \rightarrow \psi}{(\exists.\varphi) \rightarrow \psi}$$

2.

$$\frac{\psi \rightarrow \varphi}{\psi \rightarrow (\forall x.\varphi)}$$

Пример.

$$\frac{\varphi \rightarrow \psi}{\exists x.(\varphi \rightarrow \psi)}$$

— можно доказать, но это не правило вывода для \exists

Определение. $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ — доказательство

- если α_i — аксиома
- либо существует $j, k < i$, что $\alpha_k = \alpha_j \rightarrow \alpha_i$
- либо существует $\alpha_j : \alpha_j = \varphi \rightarrow \psi$ и $\alpha_i = (\exists x.\varphi) \rightarrow \psi$ причем x не входит свободно в ψ
- либо существует $j : \alpha_j = \psi \rightarrow \varphi$ и $\alpha_i = \psi \rightarrow \forall x.\varphi$ причем x не входит свободно в ψ

6.1.2 Вхождение

Пример.

$$(P(x_1) \vee Q(x_2)) \rightarrow (R(x_3) \& (\underbrace{\forall x_4. P_1(x_5)}_{\text{область } \forall \text{ по } x}))$$

1, 2, 3 — свободные, 5 — связанное, по переменной 4

Пример.

$$\underbrace{\forall x. \forall y. \forall x. \forall y. \forall x. P(x)}_{\text{область } \forall \text{ по } x}$$

Здесь x в $P(x)$ связано. x не входит свободно в эту формулу, потому что нет свободных вхождений

Определение. Переменная x входит свободно если существует свободное вхождение

Определение. Вхождение свободно, если не связано

Можно относиться к свободно входящим переменным как к переменным из библиотеки, т.е. мы не имеем права их переименовывать

Пример. Некорректная формула

$$\alpha_1 \quad x = 0 \rightarrow x = 0$$

$$\alpha_2 \quad (\exists x. x = 0) \rightarrow (x = 0) \text{ — не доказано}$$

$$\alpha'_2 \quad (\exists t. x = 0) \rightarrow (x = 0) \text{ — (правило } \exists)$$

Пример.

$$(n) \quad x = 0 \rightarrow y = 0 \text{ — откуда то}$$

$$(n+1) \quad (\exists x. x = 0) \rightarrow (y = 0) \text{ — (правило } \exists)$$

6.1.3 Свободные подстановки

Определение. Θ свободен для подстановки вместо x в φ , если никакая свободная переменная в Θ не станет связанной в $\varphi[x := \Theta]$

Определение. $\varphi[x := \Theta]$ — "Заменить все свободные вхождения x в φ на Θ "

Пример.

$$(\forall x. \forall y. \forall x. P(x))[x := y] \equiv \forall x. \forall y. \forall x. P(x)$$

Пример.

$$P(x) \vee \forall x. P(x) [x := y] \equiv P(y) \vee \forall x. P(y)$$

Пример.

$$(\forall y.x = y) [x := \underbrace{y}_{\equiv \Theta}] \equiv \forall y.y = y$$

$FV(\Theta) = \{y\}$ — свободные переменные в Θ . Вхождение y с номером 1 стало связанным

Пример.

$$P(x) \& \forall y.x = y [x := y + z] \equiv P(y + z) \& \forall y.y + z = y$$

Здесь при подстановке вхождение y с номером 1 стало связанным. x — библиотечная функция, переименовали x во что-то другое.

6.1.4 Пример доказательства

Лемма 1. Пусть $\vdash \alpha$. Тогда $\vdash \forall x.\alpha$

Доказательство.

1. Т.к. $\vdash \alpha$, то существует $\gamma_1, \dots, \gamma_n : \gamma_n = \alpha$

(1)	γ_1	
\vdots	\vdots	
(n)	$\gamma_n (\equiv \alpha)$	
(n + 1)	$A \& A \rightarrow A$	(акс)
(n + 2)	$\alpha \rightarrow ((A \& A \rightarrow A) \rightarrow \alpha)$	(акс)
(n + 3)	$(A \& A \rightarrow A) \rightarrow \alpha$	(М.Р. n, n + 2)
(n + 4)	$(A \& A \rightarrow A) \rightarrow \forall x.\alpha$	(введение \forall n + 3)
(n + 5)	$\forall x.\alpha$	(М.Р. n + 1, n + 4)

□

6.1.5 Теорема о дедукции

Теорема 6.1.1. Пусть задана Γ, α, β

1. Если $\Gamma, \alpha \vdash \beta$, то $\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta$, при условии, если b в доказательстве $\Gamma, \alpha \rightarrow \beta$ не применялись правила для \forall, \exists по переменным, входящим свободно в α

2. Если $\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta$, то $\Gamma, \alpha \vdash \beta$

1. **TODO** Доказательство

Лекция 7

- $\Gamma \models \alpha \rightarrow \alpha$ следует из Γ при всех оценках, что все $\gamma \in \Gamma$ $\llbracket \gamma \rrbracket = \text{И}$, выполнено $\llbracket \alpha \rrbracket = \text{И}$
- $x = 0 \vdash \forall x. x = 0$
- $x = 0 \not\vdash \forall x. x = 0$

Определение (Условие для корректности). Правила для кванторов по свободным переменным из Γ запрещены.

Тогда $\Gamma \vdash \alpha$ влечет $\Gamma \models \alpha$

7.1 Полнота исчисления предикатов

Определение. Γ — **непротиворечивое** множество формул, если $\Gamma \not\vdash \alpha \& \neg \alpha$ ни при каком α

Пример. Непротиворечивые:

- \emptyset
- $A \vee \neg A$

Противоречивые:

- $A \& \neg A$

Примечание. Непротиворечивое множество замкнутых (не имеющих свободных переменных) бескванторных формул

Пример. $\{A\}, \{0 = 0\}$

Определение. **Моделью** для непротиворечивого множества замкнутых бескванторных формул Γ — такая модель, что каждая формула из Γ оценивается в И

Определение. Полное непротиворечивое замкнутое бескванторных формул — такое, что для каждой замкнутой бескванторной формулы α : либо $\alpha \in \Gamma$, либо $\neg \alpha \in \Gamma$

Обозначение. **з.б.** — замкнутая бескванторная. **непр. мн** — непротиворечивое множество

Теорема 7.1.1. Если Γ — непротиворечивое множество з.б. формул и α — з.б. формула.

То либо $\Gamma \cup \{\alpha\}$, либо $\Gamma \cup \{\neg\alpha\}$ — непр. мн. з.б. формул

Доказательство. Пусть и $\Gamma \cup \{\alpha\}$ и $\Gamma \cup \{\neg\alpha\}$ Доделать □

Теорема 7.1.2. Если Γ — непр. мн. з.б. формул, то можно построить Δ — полное непр. мн. з.б. формул. $\Gamma \subseteq \Delta$ и в языке — счетное количество формул

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ — формулы з.б.

- $\Gamma_0 = \Gamma$
- $\Gamma_1 = \Gamma_0 \cup \{\varphi_1\}$ либо $\Gamma_0 \cup \{\neg\varphi_1\}$ — смотря что непротиворечивое
- $\Gamma_2 = \Gamma_1 \cup \{\varphi_2\}$ либо $\Gamma_1 \cup \{\neg\varphi_2\}$

$$\Gamma^* = \bigcup_i \Gamma_i$$

Свойство 1. Γ^* — полное

Свойство 2. Γ^* — непрерывное

Доказательство. Пусть $\Gamma^* \vdash \beta \& \neg\beta$

Конечное доказательство $\gamma_1, \dots, \gamma_n$, часть из которых гипотезы: $\gamma_1, \dots, \gamma_k$
 $\gamma_i \in \Gamma_{R_i}$. Возьмем $\Gamma_{\max R_i}$. Правда ли $\Gamma_{\max R_i} \vdash B \& \neg B$ □

Теорема 7.1.3. Любое полное непротиворечивое множество замкнутых бескванторных формул Γ имеет модель, т.е. существует оценка $\llbracket \cdot \rrbracket$: если $\gamma \in \Gamma$, то $\llbracket \gamma \rrbracket = \text{И}$

Доказательство. D — все записи из функциональных символов.

- $\llbracket f_0^n \rrbracket$ — константа $\Rightarrow "f_0^n"$
- $\llbracket f_k^m(\Theta_1, \dots, \Theta_k) \rrbracket \Rightarrow "f_k^m(" + \llbracket \Theta_1 \rrbracket + ", " + \dots + ", " + \llbracket \Theta_k \rrbracket + ")"$
- $\llbracket P(\Theta_1, \dots, \Theta_n) \rrbracket = \begin{cases} \text{И} & P(\Theta_1, \dots, \Theta_n) \in \Gamma \\ \text{Л} & \text{иначе} \end{cases}$
- свободные переменные: \emptyset

Так построенная модель — модель для Γ . Индукция по количеству связей.
 База очев.

Переход $\alpha \& \beta$. При этом

1. Если $\alpha, \beta \in \Gamma$ $\llbracket \alpha \rrbracket = \text{И}$ и $\llbracket \beta \rrbracket = \text{И}$ то $\alpha \& \beta \in \Gamma$

2. Если $\alpha, \beta \notin \Gamma \llbracket \alpha \rrbracket \neq \text{И}$ или $\llbracket \beta \rrbracket \neq \text{И}$ то $\alpha \& \beta \notin \Gamma$

Аналогично для других операций \square

Теорема 7.1.4 (Геделя о полноте). Если Γ — полное непротиворечивое множество замкнутых (не бескванторных) формул, то оно имеет модель

Следствие 7.1.4.1. Пусть $\models \alpha$, тогда $\vdash \alpha$

Доказательство. Пусть $\models \alpha$, но $\not\vdash \alpha$. Значит $\{\neg\alpha\}$ — непротиворечивое множество замкнутых формул. Тогда $\{\alpha\}$ или $\{\neg\alpha\}$ — непр. мн. з. ф. Пусть $\{\alpha\}$ — непр. мн. з. ф., а $\{\neg\alpha\}$ — противоречивое. При этом $\neg\alpha \vdash \beta \& \neg\beta$, $\neg\alpha \vdash \alpha$, $\beta \& \neg\beta \models \alpha$. $\neg\alpha \vdash \alpha$, $\alpha \vdash \alpha$. Значит $\vdash \alpha$ \square

- Γ — п.м.з.ф.
- перестроим Γ в Γ^Δ — п.н.м. **б.** з. ф.
- по теореме о существовании модели: M^Δ — модель для F^Δ
- покажем, что M^Δ — модель для $\Gamma = M$

$\Gamma_0 = \Gamma$, где все формулы — в предварительной нормальной форме

Определение. ПНФ — формула, где $\forall\exists\forall\dots(\tau)$, τ — формула без кванторов

Теорема 7.1.5. Если φ — формула, то существует ψ — в п.ф., то $\varphi \rightarrow \psi$ и $\psi \rightarrow \varphi$

Доказательство. $\Gamma_0 \subseteq \Gamma_1 \subseteq \Gamma_2 \subseteq \dots \subseteq \Gamma^*$. $\Gamma^* = \bigcup_i \Gamma_i$

Переход: $\Gamma_i \rightarrow \Gamma_{i+1}$

Рассмотрим: $\varphi_j \in \Gamma_i$

Построим семейство ф.с. d_i^j — новые переменные

1. φ_j без кванторов — не трогаем
2. $\varphi_j \equiv \forall x.\psi$ — добавим все формулы вида $\psi[x := \Theta]$, где Θ — терм, состоящий из $f: d_0^e, d_1^{e'} \dots, d_{i-1}^{e' \dots'}$
3. $\varphi_j \equiv \exists x.\psi$ — добавим $\psi[x := d_i^j]$

$\Gamma_{i+1} = \Gamma_i \cup \{\text{все добавленные формулы}\}$ — счетное количество \square

Теорема 7.1.6. Если Γ_i — непротиворечиво, то Γ_{i+1} — непротиворечиво

Теорема 7.1.7. Γ^* — непротиворечиво

Следствие 7.1.7.2. $\Gamma^\Delta = \Gamma^*$ без формул с \forall, \exists