

Примечание. Эти решения проверены только частично через lean, верность не гарантируется.

Упражнение (2.d). $\vdash A \& B \rightarrow B \& A$

Докажем, что $A \& B \vdash B \& A$, это эквивалентно искомому.

1. $A \& B$ ($\in \Gamma$)
2. $A \& B \rightarrow A$ (a. 4)
3. A (M.P. 1, 2)
4. $A \& B \rightarrow B$ (a. 5)
5. B (M.P. 1, 4)
6. $A \rightarrow B \rightarrow A \& B$ (a. 3)
7. $B \rightarrow A \& B$ (M.P. 3,6)
8. $A \& B$ (M.P. 5,7)

Упражнение (2.e). $\vdash A \rightarrow \neg\neg A$

Докажем, что $A \vdash \neg\neg A$, это эквивалентно искомому.

1. A ($\in \Gamma$)
2. $A \rightarrow (\neg A \rightarrow A)$ (a. 1)
3. $\neg A \rightarrow A$ (M.P. 1, 2)
4. $\neg A \rightarrow \neg A$ (доказано ранее)
5. $(\neg A \rightarrow \neg A) \rightarrow (\neg A \rightarrow A) \rightarrow \neg\neg A$ (a. 9)
6. $(\neg A \rightarrow A) \rightarrow \neg\neg A$ (M.P. 4,5)
7. $\neg\neg A$ (M.P. 3,6)

Упражнение (2.f). $A \& \neg A \vdash B$

1. $A \& \neg A$ ($\in \Gamma$)
2. $A \& \neg A \rightarrow A$ (a. 4)
3. $A \& \neg A \rightarrow \neg A$ (a. 5)
4. A (M.P. 1, 2)
5. $\neg A$ (M.P. 1, 3)
6. $A \rightarrow (\neg B \rightarrow A)$ (a. 1)
7. $\neg B \rightarrow A$ (M.P. 4, 6)

8. $\neg A \rightarrow (\neg B \rightarrow \neg A)$ (a. 1)
9. $\neg B \rightarrow \neg A$ (M.P. 5, 8)
10. $(\neg B \rightarrow A) \rightarrow (\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg\neg B$ (a. 9)
11. $(\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg\neg B$ (M.P. 7,10)
12. $\neg\neg B$ (M.P. 9,11)
13. $\neg\neg B \rightarrow B$ (a. 10)
14. B (M.P. 12,13)

Упражнение (3.a). $\neg A, B \vdash \neg(A \& B)$

1. $A \& B \rightarrow A$ (a. 4)
2. $\neg A \rightarrow (A \& B) \rightarrow \neg A$ (a. 1)
3. $\neg A$ ($\in \Gamma$)
4. $A \& B \rightarrow \neg A$ (M.P. 2,3)
5. $(A \& B \rightarrow A) \rightarrow (A \& B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg(A \& B)$ (a. 9)
6. $(A \& B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg(A \& B)$ (M.P. 1, 5)
7. $\neg(A \& B)$ (M.P. 4,6)

Упражнение (3.b). $A, \neg B \vdash \neg(A \& B)$

1. $A \& B \rightarrow B$ (a. 4)
2. $\neg B \rightarrow (A \& B) \rightarrow \neg B$ (a. 1)
3. $\neg B$ ($\in \Gamma$)
4. $A \& B \rightarrow \neg B$ (M.P. 2,3)
5. $(A \& B \rightarrow B) \rightarrow (A \& B \rightarrow \neg B) \rightarrow \neg(A \& B)$ (a. 9)
6. $(A \& B \rightarrow \neg B) \rightarrow \neg(A \& B)$ (M.P. 1, 5)
7. $\neg(A \& B)$ (M.P. 4,6)

Упражнение (3.c). $\neg A, \neg B \vdash \neg(A \& B)$

1. $A \& B \rightarrow B$ (a. 4)

2. $\neg B \rightarrow (A \& B) \rightarrow \neg B$ (a. 1)
3. $\neg B$ ($\in \Gamma$)
4. $A \& B \rightarrow \neg B$ (М.Р. 2,3)
5. $(A \& B \rightarrow B) \rightarrow (A \& B \rightarrow \neg B) \rightarrow \neg(A \& B)$ (a. 9)
6. $(A \& B \rightarrow \neg B) \rightarrow \neg(A \& B)$ (М.Р. 1, 5)
7. $\neg(A \& B)$ (М.Р. 4,6)

Упражнение (3.d). $\neg A, \neg B \vdash \neg(A \vee B)$

1. $(A \vee B \rightarrow A) \rightarrow (A \vee B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg(A \vee B)$ (a. 9)
2. $(A \rightarrow A) \rightarrow (B \rightarrow A) \rightarrow (A \vee B \rightarrow A)$ (a. 8)
3. $A \rightarrow A$ (доказано ранее)
4. $(B \rightarrow A) \rightarrow (A \vee B \rightarrow A)$ (М.Р. 2,3)
5. $\neg A$ ($\in \Gamma$)
6. $\neg B$ ($\in \Gamma$)
7. $\neg A \rightarrow \neg B \rightarrow B \rightarrow A$ (3.g)
8. $\neg B \rightarrow B \rightarrow A$ (М.Р. 5, 7)
9. $B \rightarrow A$ (М.Р. 6, 8)
10. $A \vee B \rightarrow A$ (М.Р. 4, 9)
11. $(A \vee B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg(A \vee B)$ (М.Р. 1, 10)
12. $\neg A \rightarrow (A \vee B \rightarrow \neg A)$ (a. 1)
13. $A \vee B \rightarrow \neg A$ (М.Р. 5,12)
14. $\neg(A \vee B)$ (М.Р. 11,13)

Упражнение (3.e). $A, \neg B \vdash \neg(A \rightarrow B)$

30 (c) $A, \neg B \vdash \neg(A \rightarrow B)$

1) $A \rightarrow B \rightarrow B \rightarrow \{A \rightarrow B\} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \overline{A \rightarrow B}$
 2) $\{A \rightarrow B\} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \overline{A \rightarrow B} \rightarrow A \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow \{A \rightarrow B\} \rightarrow B$
 3) $A \rightarrow \{A \rightarrow B\} \rightarrow A$ 4) A 5) $\{A \rightarrow B\} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \overline{A \rightarrow B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow \overline{A \rightarrow B}$
 6) $A \rightarrow \{A \rightarrow B\} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \overline{A \rightarrow B} \rightarrow \{A \rightarrow B\} \rightarrow B$ (2, 5, МР) 6.5) $\alpha \rightarrow \alpha$
 7) $\{A \rightarrow B\} \rightarrow B$ 8) $\{A \rightarrow B\} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \overline{A \rightarrow B}$ (1, 7, МР)
 9) $\bar{B} \rightarrow \{A \rightarrow B\} \rightarrow \bar{B}$ 10) \bar{B}
 11) $A \rightarrow B \rightarrow \bar{B}$ (9, 10, МР)
 12) $\overline{A \rightarrow B}$ (8, 11, МР)

 $A \rightarrow B \vdash A \rightarrow B$
 $(A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow B)$

Упражнение (3.f). $\neg A, B \vdash A \rightarrow B$

Докажем $\neg A, B, A \vdash B$, т.к. это эквивалентно по теореме об индукции.

1. B ($\in \Gamma$)

Упражнение (3.g). $\neg A, \neg B \vdash A \rightarrow B$

Докажем $\neg A, \neg B, A \vdash B$, т.к. это эквивалентно по теореме об индукции.

1. A ($\in \Gamma$)
2. $\neg A$ ($\in \Gamma$)
3. $A \rightarrow (\neg B \rightarrow A)$ (a. 1)
4. $\neg B \rightarrow A$ (М.Р. 1, 3)
5. $\neg A \rightarrow (\neg B \rightarrow \neg A)$ (a. 1)
6. $\neg B \rightarrow \neg A$ (М.Р. 2, 5)
7. $(\neg B \rightarrow A) \rightarrow (\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg \neg B$ (a. 9)
8. $(\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg \neg B$ (М.Р. 4, 7)
9. $\neg \neg B$ (М.Р. 6, 8)
10. $\neg \neg B \rightarrow B$ (a. 10)

11. B

(М.Р. 9, 10)

Упражнение (3.h). $\vdash (A \rightarrow B) \rightarrow (B \rightarrow C) \rightarrow (A \rightarrow C)$

$$\begin{aligned}
 & \vdash (A \rightarrow B) \rightarrow (B \rightarrow C) \rightarrow (A \rightarrow C) \\
 & (A \rightarrow B) \vdash (B \rightarrow C) \rightarrow (A \rightarrow C) \\
 & (A \rightarrow B), (B \rightarrow C) \vdash (A \rightarrow C) \\
 & (A \rightarrow B), (B \rightarrow C), A \vdash C
 \end{aligned}$$

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. A | ($\in \Gamma$) |
| 2. $A \rightarrow B$ | ($\in \Gamma$) |
| 3. B | (М.Р. 1,2) |
| 4. $B \rightarrow C$ | ($\in \Gamma$) |
| 5. C | (М.Р. 3,4) |

Упражнение (3.i). $\vdash (A \rightarrow B) \rightarrow (B \rightarrow C) \rightarrow (C \rightarrow A)$

Это утверждение не тавтология, что проверяется подстановкой 0, 0, 1. В силу корректности исчисления высказываний из пустого множества можно вывести только тавтологии, таким образом это утверждение не выводится.

Упражнение (3.j). $\vdash (A \rightarrow B) \rightarrow (\neg B \rightarrow \neg A)$

$$\begin{aligned}
 & \vdash (A \rightarrow B) \rightarrow (\neg B \rightarrow \neg A) \\
 & (A \rightarrow B) \vdash \neg B \rightarrow \neg A \\
 & (A \rightarrow B), \neg B \vdash \neg A
 \end{aligned}$$

- | | |
|--|------------------|
| 1. $A \rightarrow B$ | ($\in \Gamma$) |
| 2. $\neg B$ | ($\in \Gamma$) |
| 3. $\neg B \rightarrow A \rightarrow \neg B$ | (a. 1) |
| 4. $A \rightarrow \neg B$ | (М.Р. 2,3) |
| 5. $(A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow \neg B) \rightarrow \neg A$ | (a. 9) |
| 6. $(A \rightarrow \neg B) \rightarrow \neg A$ | (М.Р. 1,5) |
| 7. $\neg A$ | (М.Р. 4,6) |

Упражнение (4.a). $\vdash A \vee \neg A$

1. $A \rightarrow A \vee \neg A$ (акс. 6)
2. $\neg A \rightarrow A \vee \neg A$ (акс. 7)
3. $\neg\neg(A \vee \neg A) \rightarrow \neg A$ (закон контрапозиции)
4. $\neg(A \vee \neg A) \rightarrow \neg\neg A$ (закон контрапозиции)
5. $(\neg(A \vee \neg A) \rightarrow \neg A) \rightarrow (\neg(A \vee \neg A) \rightarrow \neg\neg A) \rightarrow \neg\neg(A \vee \neg A)$ (акс. 9)
6. $(\neg(A \vee \neg A) \rightarrow \neg\neg A) \rightarrow \neg\neg(A \vee \neg A)$ (М.Р. 4,6)
7. $\neg\neg(A \vee \neg A)$ (М.Р. 5,7)
8. $\neg\neg(A \vee \neg A) \rightarrow A \vee \neg A$ (акс. 10)
9. $A \vee \neg A$ (М.Р. 8,9)

Упражнение (4.b). $\vdash A \& B \rightarrow \neg(\neg A \vee \neg B)$

1. $A \& B \vdash \neg(\neg A \vee \neg B)$ (т. о дедукции)
2. $(\neg A \vee \neg B \rightarrow A) \rightarrow (\neg A \vee \neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg(\neg A \vee \neg B)$ (акс.9)
3. $A \& B \rightarrow A$ (акс. 4)
4. $A \& B \rightarrow B$ (акс. 5)
5. A (М.Р. 3, 1)
6. B (М.Р. 4, 1)
7. $A \rightarrow (\neg A \vee \neg B) \rightarrow A$ (акс.1)
8. $(\neg A \vee \neg B) \rightarrow A$ (М.Р. 7, 5)
9. $(\neg A \vee \neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow \neg(\neg A \vee \neg B)$ (М.Р. 2, 8)
10. $(\neg A \rightarrow \neg A) \rightarrow (\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow (\neg A \vee \neg B \rightarrow \neg A)$ (акс. 8)
11. $(\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow (\neg A \vee \neg B \rightarrow \neg A)$ (М.Р. 8 и известный факт)
12. $B, A \vdash \neg B \rightarrow \neg A$ равносильно $B, A, \neg B \vdash \neg A$ (т. о дедукции)
13. $(A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow \neg B) \rightarrow \neg A$ (акс.9)
14. $\neg A$ (дважды аксиома 1 из B и $\neg B$)
15. $\neg B \rightarrow \neg A$ (доказали по дедукции)
16. $(\neg A \vee \neg B \rightarrow \neg A)$ (М.Р. 11, 15)
17. $\neg(\neg A \vee \neg B)$ (М.Р. 9, 16)

Упражнение (4.c). $\vdash \neg(\neg A \& \neg B) \rightarrow A \vee B$

Упражнение (4.d). $\vdash A \& \neg A \rightarrow A \vee B$

$$\begin{array}{l} \vdash A \& \neg A \rightarrow A \vee B \\ A \& \neg A \vdash A \vee B \end{array}$$

- | | | |
|----|-----------------------------|----------------|
| 1. | $A \& \neg A$ | $(\in \Gamma)$ |
| 2. | $A \& \neg A \rightarrow A$ | $(a. 4)$ |
| 3. | A | $(M.P. 1,2)$ |
| 4. | $A \rightarrow A \vee B$ | $(a. 6)$ |
| 5. | $A \vee B$ | $(M.P. 3,4)$ |

Упражнение (4.e). $\vdash ((A \rightarrow B) \rightarrow A) \rightarrow A$

Идея решения — рассмотрим три случая : $A \in \Gamma$; $\neg A, B \in \Gamma$; $\neg A, \neg B \in \Gamma$

Упражнение (5). Даны высказывания α и β , причём $\vdash \alpha \rightarrow \beta$ и $\alpha \not\equiv \beta$. Укажите способ построения высказывания γ , такого, что $\vdash \alpha \rightarrow \gamma$ и $\vdash \gamma \rightarrow \beta$, причём $\alpha \not\equiv \gamma$ и $\beta \not\equiv \gamma$.

Решение, рассказанное на паре $\gamma := \alpha \& \beta$, неверное, т.к. при тавтологии β выполняется $\alpha \equiv \gamma$.

Верное решение: пусть множество подстановок, на которых α выполняется — \mathcal{A} , для β — \mathcal{B} . Несложно заметить, что $\mathcal{A} \subset \mathcal{B}$, при этом $|\mathcal{A}| < |\mathcal{B}|$. Если $|\mathcal{A}| < |\mathcal{B}| - 1$, то можно найти множество между ними, т.е. $\mathcal{A} \subset \mathcal{C} \subset \mathcal{B}$. Если $|\mathcal{A}| = |\mathcal{B}| - 1$, то нужно ввести новую переменную, чтобы разница стала больше.

Упражнение (6). $\alpha \vdash \beta, \neg \alpha \vdash \beta \Rightarrow \vdash \beta$

- | | | |
|-----|--|----------------|
| 1. | α | $(\in \Gamma)$ |
| 2. | $\alpha \rightarrow (\neg \beta \rightarrow \alpha)$ | $(a. 1)$ |
| 3. | $\neg \beta \rightarrow \alpha$ | $(M.P. 1,2)$ |
| 4. | $\neg \alpha$ | $(\in \Gamma)$ |
| 5. | $\neg \alpha \rightarrow (\neg \beta \rightarrow \neg \alpha)$ | $(a. 1)$ |
| 6. | $\neg \beta \rightarrow \neg \alpha$ | $(M.P. 4,5)$ |
| 7. | $(\neg \beta \rightarrow \alpha) \rightarrow (\neg \beta \rightarrow \neg \alpha) \rightarrow \neg \neg \beta$ | $(a. 9)$ |
| 8. | $(\neg \beta \rightarrow \neg \alpha) \rightarrow \neg \neg \beta$ | $(M.P. 3,7)$ |
| 9. | $\neg \neg \beta$ | $(M.P. 6,8)$ |
| 10. | $\neg \neg \beta \rightarrow \beta$ | $(a. 10)$ |

11. β

(М.Р. 9,10)