

УДК 621.771

**КОМБИНАЦИОННОЕ ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА
СРЫВА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ТЕОРИИ ПРОКАТКИ****Мальцев Андрей Анатольевич**

доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ имени Н.Э. Баумана

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

Четвертак Юлия Сергеевна

старший преподаватель кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана

e-mail: chetvertak@bmstu.ru

Аннотация

В программной среде Multisim разработана компьютерная модель комбинационного цифрового устройства для мониторинга работоспособности лабораторной установки, состоящей из двух муфельных электропечей и трех прокатных станов, объединенных в единую техническую систему.

Ключевые слова: электроника, работоспособность, риск, прокатка

**DIGITAL COMBINATION DEVICE FOR ASSESSING THE RISK OF
DISRUPTION OF LABORATORY WORK ON ROLLING THEORY****Andrey A. Maltsev**

associate professor of BMSTU ФН-7 and МТ-10 departments

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

Julia S. Chetvertak

senior lecturer of BMSTU ФН-7 department

e-mail: chetvertak@bmstu.ru

ABSTRACT

In the Multisim software environment, a computer model of a digital combination device has been developed to monitor the performance of a laboratory unit consisting of two muffle electric furnaces and three rolling mills combined into a single technical system.

Keywords: electronics, performance, risk, rolling.

Актуальность темы исследования связана с цифровизацией прокатного производства [1].

Объект исследования – лабораторная установка, состоящая из двух муфельных электропечей и трех прокатных станов, подключенных к электрической сети (рис. 1).

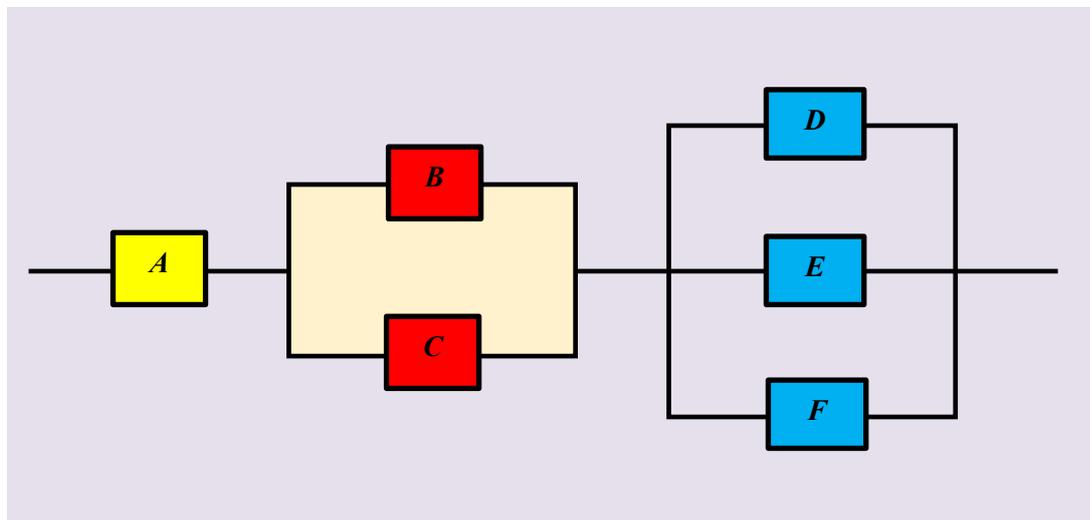


Рисунок 1. Структурная схема надежности объекта:

- A – электросеть;
- B – первая муфельная электропечь;
- C – вторая муфельная электропечь;
- D – первый прокатный стан;
- E – второй прокатный стан;
- F – третий прокатный стан

Цель и задача исследования – разработать в программной среде Multisim компьютерную модель комбинационного цифрового устройства [2, 3] для проверки работоспособности объекта.

Материалы и методы исследования взяты из ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» и ГОСТ Р 51901.14 – 2005 «Менеджмент риска. Метод структурной схемы надёжности».

Разрабатываемое комбинационное цифровое устройство должно иметь шесть входов (A, B, C, D, E, F) и один выход (Y); объект исследования находится или в работоспособном ($Y = 1$), или в неработоспособном ($Y = 0$) техническом состоянии. Функциональная зависимость $Y(A, B, C, D, E, F)$ может быть задана следующим словесным описанием: лабораторная работа состоится ($Y = 1$), если работоспособна электросеть ($A = 1$) и работоспособна хотя бы одна из двух муфельных электропечей ($(B = 1)$ или $(C = 1)$), и работоспособен хотя бы один из трех прокатных станом ($(D = 1)$ или $(E = 1)$ или $(F = 1)$).

Кроме того, функциональная зависимость $Y(A, B, C, D, E, F)$ была задана в табличной форме (табл. 1).

Таблица 1. Таблица истинности логической функции Y

№ набора	Набор аргументов						Y
	A	B	C	D	E	F	
0	0	0	0	0	0	0	0

1	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0
6	0	0	0	1	1	0	0
7	0	0	0	1	1	1	0
8	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	1	0
10	0	0	1	0	1	0	0
11	0	0	1	0	1	1	0
12	0	0	1	1	0	0	0
13	0	0	1	1	0	1	0
14	0	0	1	1	1	0	0
15	0	0	1	1	1	1	0
16	0	1	0	0	0	0	0
17	0	1	0	0	0	1	0
18	0	1	0	0	1	0	0
19	0	1	0	0	1	1	0
20	0	1	0	1	0	0	0
21	0	1	0	1	0	1	0
22	0	1	0	1	1	0	0
23	0	1	0	1	1	1	0
24	0	1	1	0	0	0	0
25	0	1	1	0	0	1	0
26	0	1	1	0	1	0	0
27	0	1	1	0	1	1	0
28	0	1	1	1	0	0	0
29	0	1	1	1	0	1	0
30	0	1	1	1	1	0	0
31	0	1	1	1	1	1	0
32	1	0	0	0	0	0	0
33	1	0	0	0	0	1	0
34	1	0	0	0	1	0	0
35	1	0	0	0	1	1	0
36	1	0	0	1	0	0	0
37	1	0	0	1	0	1	0
38	1	0	0	1	1	0	0
39	1	0	0	1	1	1	0
40	1	0	1	0	0	0	0
41	1	0	1	0	0	1	1
42	1	0	1	0	1	0	1
43	1	0	1	0	1	1	1
44	1	0	1	1	0	0	1
45	1	0	1	1	0	1	1
46	1	0	1	1	1	0	1
47	1	0	1	1	1	1	1

48	1	1	0	0	0	0	0
49	1	1	0	0	0	1	1
50	1	1	0	0	1	0	1
51	1	1	0	0	1	1	1
52	1	1	0	1	0	0	1
53	1	1	0	1	0	1	1
54	1	1	0	1	1	0	1
55	1	1	0	1	1	1	1
56	1	1	1	0	0	0	0
57	1	1	1	0	0	1	1
58	1	1	1	0	1	0	1
59	1	1	1	0	1	1	1
60	1	1	1	1	0	0	1
61	1	1	1	1	0	1	1
62	1	1	1	1	1	0	1
63	1	1	1	1	1	1	1

По таблице истинности записано в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ) аналитическое выражение логической функции:

$$Y = 1 = \quad (1)$$

= минтерм №41 +
 + минтерм №42 +
 + минтерм №43 +
 + минтерм №44 +
 + минтерм №45 +
 + минтерм №46 +
 + минтерм №47 +

+ минтерм №49 +
 + минтерм №50 +
 + минтерм №51 +
 + минтерм №52 +
 + минтерм №53 +
 + минтерм №54 +
 + минтерм №55 +

+ минтерм №57 +
 + минтерм №58 +
 + минтерм №59 +
 + минтерм №60 +
 + минтерм №61 +
 + минтерм №62 +
 + минтерм №63 =

$$= A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot F +$$

$$+ A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot \bar{D} \cdot E \cdot \bar{F} +$$

$$+ A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot \bar{D} \cdot E \cdot F +$$

$$\begin{aligned}
 &+ A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot D \cdot \bar{E} \cdot \bar{F} + \\
 &+ A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot D \cdot \bar{E} \cdot F + \\
 &+ A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot D \cdot E \cdot \bar{F} + \\
 &+ A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F + \\
 &+ A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot F + \\
 &+ A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot E \cdot \bar{F} + \\
 &+ A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot E \cdot F + \\
 &+ A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot D \cdot \bar{E} \cdot \bar{F} + \\
 &+ A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot D \cdot \bar{E} \cdot F + \\
 &+ A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot D \cdot E \cdot \bar{F} + \\
 &+ A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot D \cdot E \cdot F + \\
 &+ A \cdot B \cdot C \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot F + \\
 &+ A \cdot B \cdot C \cdot \bar{D} \cdot E \cdot \bar{F} + \\
 &+ A \cdot B \cdot C \cdot \bar{D} \cdot E \cdot F + \\
 &+ A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot \bar{E} \cdot \bar{F} + \\
 &+ A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot \bar{E} \cdot F + \\
 &+ A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot \bar{F} + \\
 &+ A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F
 \end{aligned}$$

Таким образом, логическая функция была представлена в СДНФ как сумма элементарных конъюнкций (минтермов), на которых эта логическая функция принимает значение «1».

Для упрощения аналитического выражения $Y(A, B, C, D, E, F)$ сформирована карта Карно, представленная в виде 64-клетчатой матрицы, где каждая клетка связана с номером определенного набора аргументов (табл. 2).

Таблица 2. Карта Карно с номерами наборов аргументов

			\bar{E}	E	E	\bar{E}	\bar{E}	E	E	\bar{E}
			\bar{C}	\bar{C}	C	C	C	C	\bar{C}	\bar{C}
			A	A	A	A	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}
\bar{F}	\bar{D}	B	№48	№50	№58	№56	№24	№26	№18	№16
F	\bar{D}	B	№49	№51	№59	№57	№25	№27	№19	№17
F	D	B	№53	№55	№63	№61	№29	№31	№23	№21
\bar{F}	D	B	№52	№54	№62	№60	№28	№30	№22	№20

\bar{F}	D	\bar{B}	№36	№38	№46	№44	№12	№14	№6	№4
F	D	\bar{B}	№37	№39	№47	№45	№13	№15	№7	№5
F	\bar{D}	\bar{B}	№33	№35	№43	№41	№9	№11	№3	№1
\bar{F}	\bar{D}	\bar{B}	№32	№34	№42	№40	№8	№10	№2	№0

Карта Карно заполнена путем записи «1» в следующие клетки (табл. 3):

№41, №42, №43, №44, №45, №46, №47;

№49, №50, №51, №52, №53, №54, №55;

№57, №58, №59, №60, №61, №62, №63.

Номера этих клеток совпадают с номерами наборов аргументов (минтермов), на которых логическая функция принимает значение «1».

Таблица 3. Карта Карно

			\bar{E}	E	E	\bar{E}	\bar{E}	E	E	\bar{E}
			\bar{C}	\bar{C}	C	C	C	C	\bar{C}	\bar{C}
			A	A	A	A	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}
\bar{F}	\bar{D}	B	0	1	1	0	0	0	0	0
F	\bar{D}	B	1	1	1	1	0	0	0	0
F	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	0	0	0	0	0

Логическая функция, записанная в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ), имеет следующий вид (табл. 4 – 9):

$$Y = A \cdot C \cdot F + A \cdot C \cdot E + A \cdot C \cdot D + A \cdot B \cdot F + A \cdot B \cdot E + A \cdot B \cdot D = 1. \quad (2)$$

Таблица 4. Визуализация операции склеивания для импликанты $A \cdot C \cdot F$

			\bar{E}	E	E	\bar{E}	\bar{E}	E	E	\bar{E}
			\bar{C}	\bar{C}	C	C	C	C	\bar{C}	\bar{C}
			A	A	A	A	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}
\bar{F}	\bar{D}	B	0	1	1	0	0	0	0	0
F	\bar{D}	B	1	1	1	1	0	0	0	0
F	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	0	0	0	0	0

Таблица 5. Визуализация операции склеивания для импликанты $A \cdot C \cdot E$

			\bar{E}	E	E	\bar{E}	\bar{E}	E	E	\bar{E}
			\bar{C}	\bar{C}	C	C	C	C	\bar{C}	\bar{C}
			A	A	A	A	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}
\bar{F}	\bar{D}	B	0	1	1	0	0	0	0	0
F	\bar{D}	B	1	1	1	1	0	0	0	0

F	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	0	0	0	0	0

Таблица 6. Визуализация операции склеивания для импликанты $A \cdot C \cdot D$

			\bar{E}	E	E	\bar{E}	\bar{E}	E	E	\bar{E}
			\bar{C}	\bar{C}	C	C	C	C	\bar{C}	\bar{C}
			A	A	A	A	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}
\bar{F}	\bar{D}	B	0	1	1	0	0	0	0	0
F	\bar{D}	B	1	1	1	1	0	0	0	0
F	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	0	0	0	0	0

Таблица 7. Визуализация операции склеивания для импликанты $A \cdot B \cdot F$

			\bar{E}	E	E	\bar{E}	\bar{E}	E	E	\bar{E}
			\bar{C}	\bar{C}	C	C	C	C	\bar{C}	\bar{C}
			A	A	A	A	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}
\bar{F}	\bar{D}	B	0	1	1	0	0	0	0	0
F	\bar{D}	B	1	1	1	1	0	0	0	0
F	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	0	0	0	0	0

Таблица 8. Визуализация операции склеивания для импликанты $A \cdot B \cdot E$

			\bar{E}	E	E	\bar{E}	\bar{E}	E	E	\bar{E}
			\bar{C}	\bar{C}	C	C	C	C	\bar{C}	\bar{C}
			A	A	A	A	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}
\bar{F}	\bar{D}	B	0	1	1	0	0	0	0	0
F	\bar{D}	B	1	1	1	1	0	0	0	0
F	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0

\bar{F}	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	0	0	0	0	0

Таблица 9. Визуализация операции склеивания для импликанты $A \cdot B \cdot D$

			\bar{E}	E	E	\bar{E}	\bar{E}	E	E	\bar{E}
			\bar{C}	\bar{C}	C	C	C	C	\bar{C}	\bar{C}
			A	A	A	A	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}	\bar{A}
\bar{F}	\bar{D}	B	0	1	1	0	0	0	0	0
F	\bar{D}	B	1	1	1	1	0	0	0	0
F	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	B	1	1	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	D	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
F	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	1	0	0	0	0
\bar{F}	\bar{D}	\bar{B}	0	0	1	0	0	0	0	0

В программной среде Multisim разработано комбинационное цифровое устройство для оценки работоспособности объекта исследования (рис. 2).

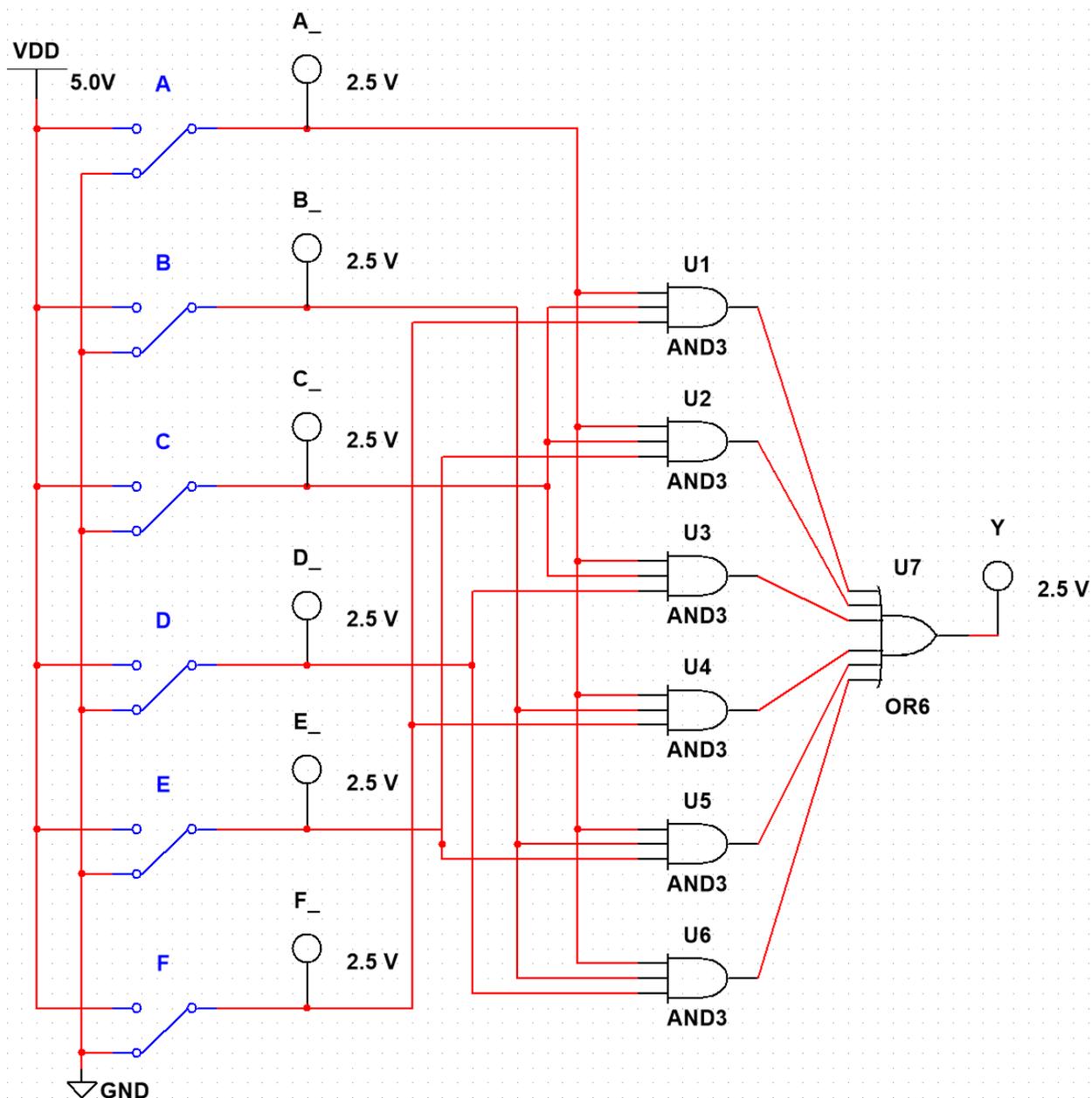


Рисунок 2. Компьютерная модель устройства:

U1, U2, U3, U4, U5, U6 – логические элементы «И»;

U7 – логический элемент «ИЛИ»; A, B, C, D, E, F – переключатели;

A_, B_, C_, D_, E_, F_, Y – светодиоды (порог срабатывания 2,5 В)

VDD – напряжение питания 5 В (логическая единица);

GND – заземление (логический ноль)

Ниже приведены примеры верификации в программной среде Multisim работоспособности разработанной авторами компьютерной модели комбинационного цифрового устройства (рис. 3 – 7).

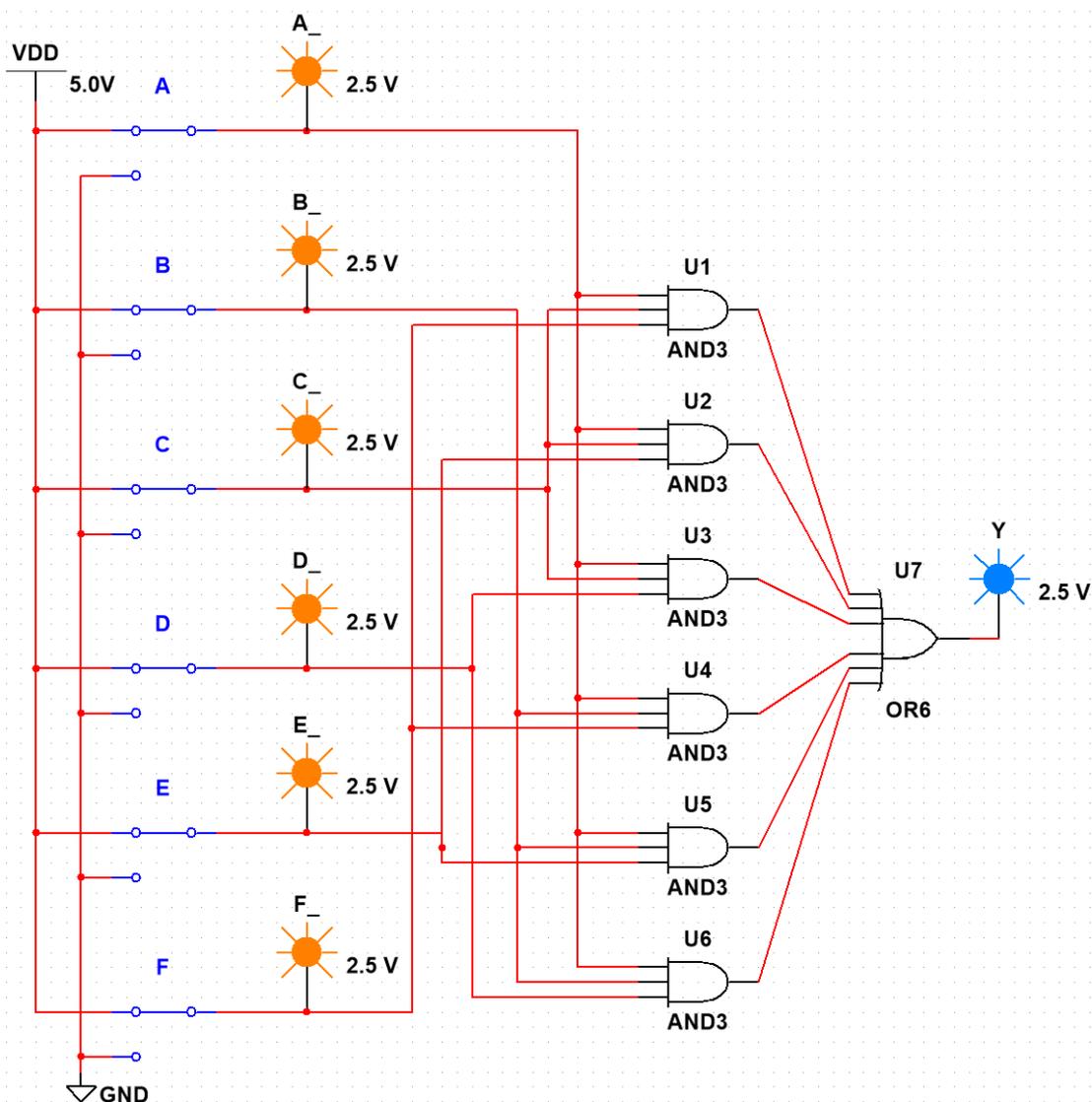


Рисунок 3. Верификация компьютерной модели (набор №63)

Вывод: компьютерная модель сработала правильно (набор №63) – лабораторная работа состоится ($Y = 1$), поскольку работоспособна электросеть ($A = 1$), работоспособна первая муфельная электропечь ($B = 1$), работоспособна вторая муфельная электропечь ($C = 1$), работоспособен первый прокатный стан ($D = 1$), работоспособен второй прокатный стан ($E = 1$), работоспособен третий прокатный стан ($F = 1$).

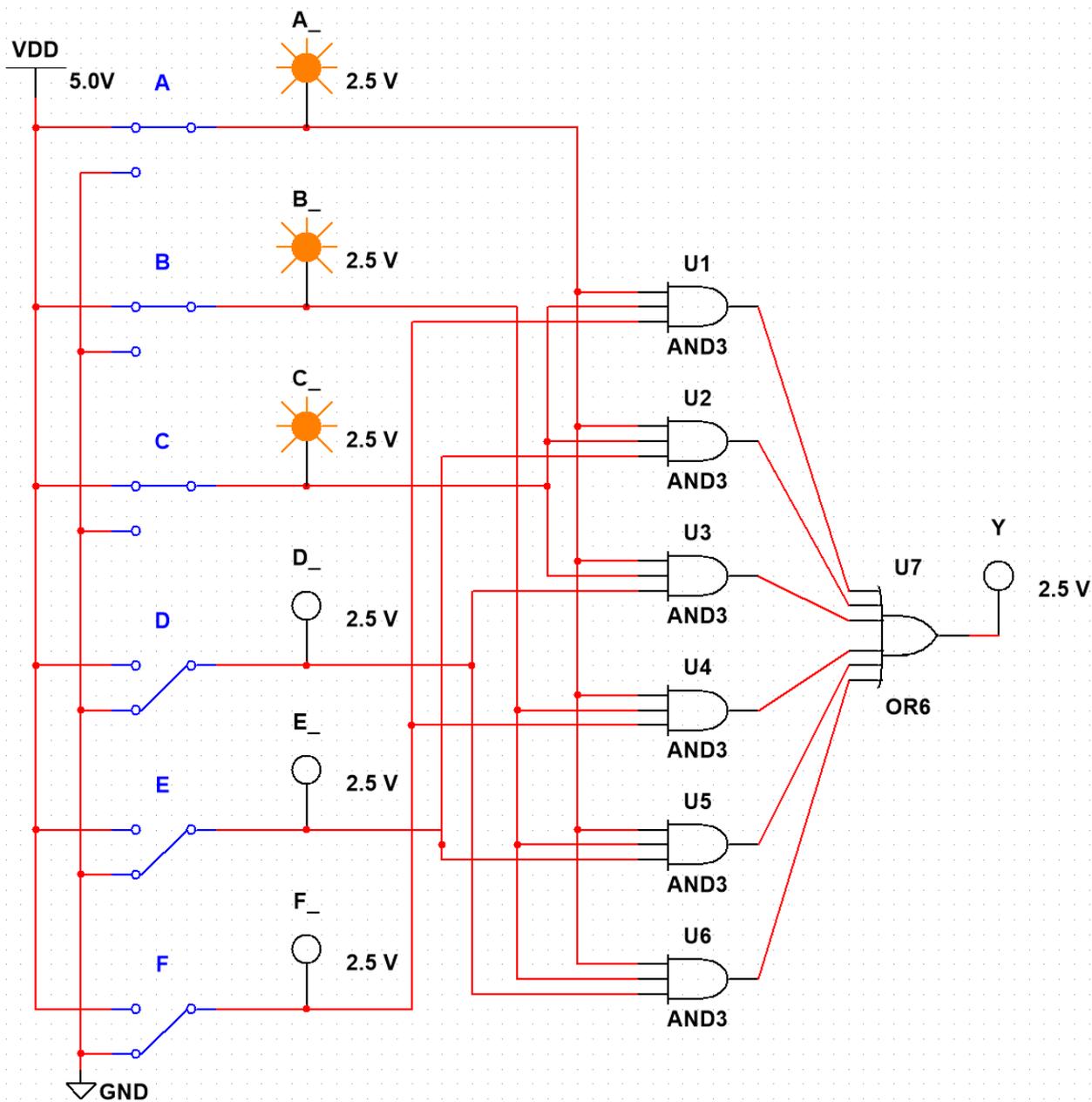


Рисунок 4. Верификация компьютерной модели (набор №56)

Вывод: компьютерная модель сработала правильно (набор №56) – лабораторная работа не состоится ($Y = 0$), поскольку ни один из трех прокатных станов не работоспособен ($D = E = F = 0$).

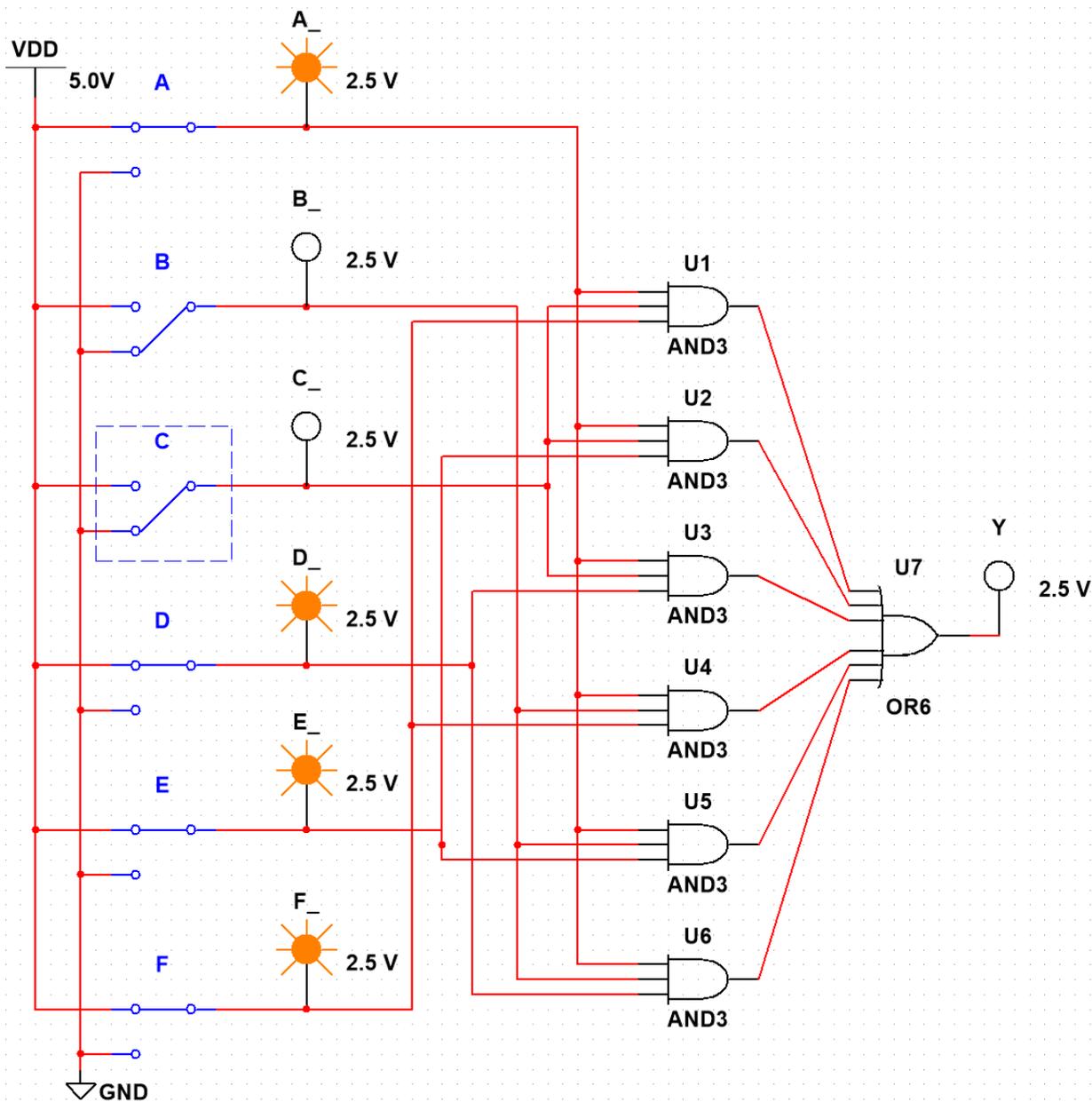


Рисунок 5. Верификация компьютерной модели (набор №39)

Вывод: компьютерная модель сработала правильно (набор №39) – лабораторная работа не состоится ($Y = 0$), поскольку ни одна из двух муфельных электропечей не работоспособна ($B = C = 0$).

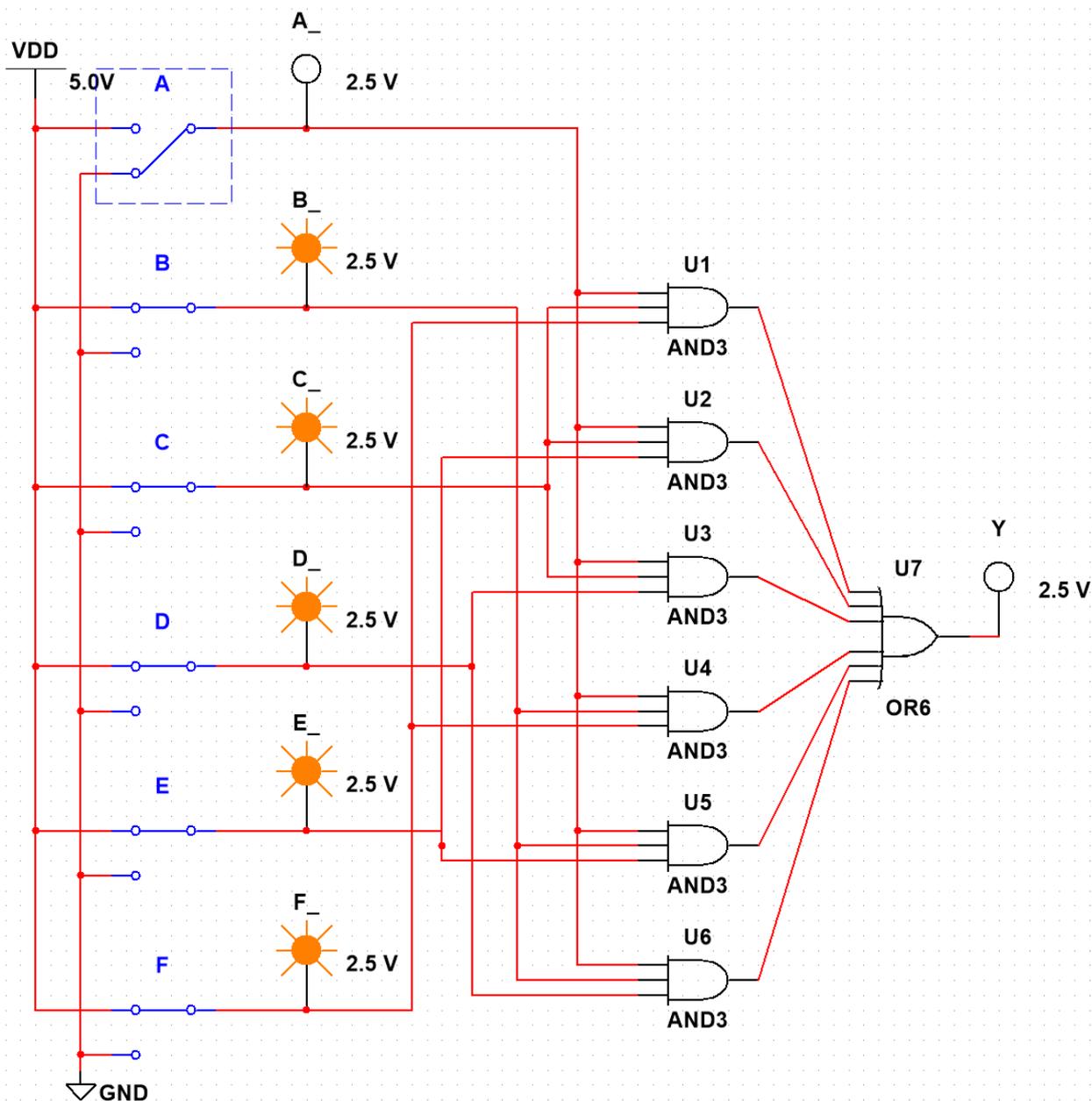


Рисунок 6. Верификация компьютерной модели (набор №31)

Вывод: компьютерная модель сработала правильно (набор №31) – лабораторная работа не состоится ($Y = 0$), поскольку не работоспособна электросеть ($A = 0$).

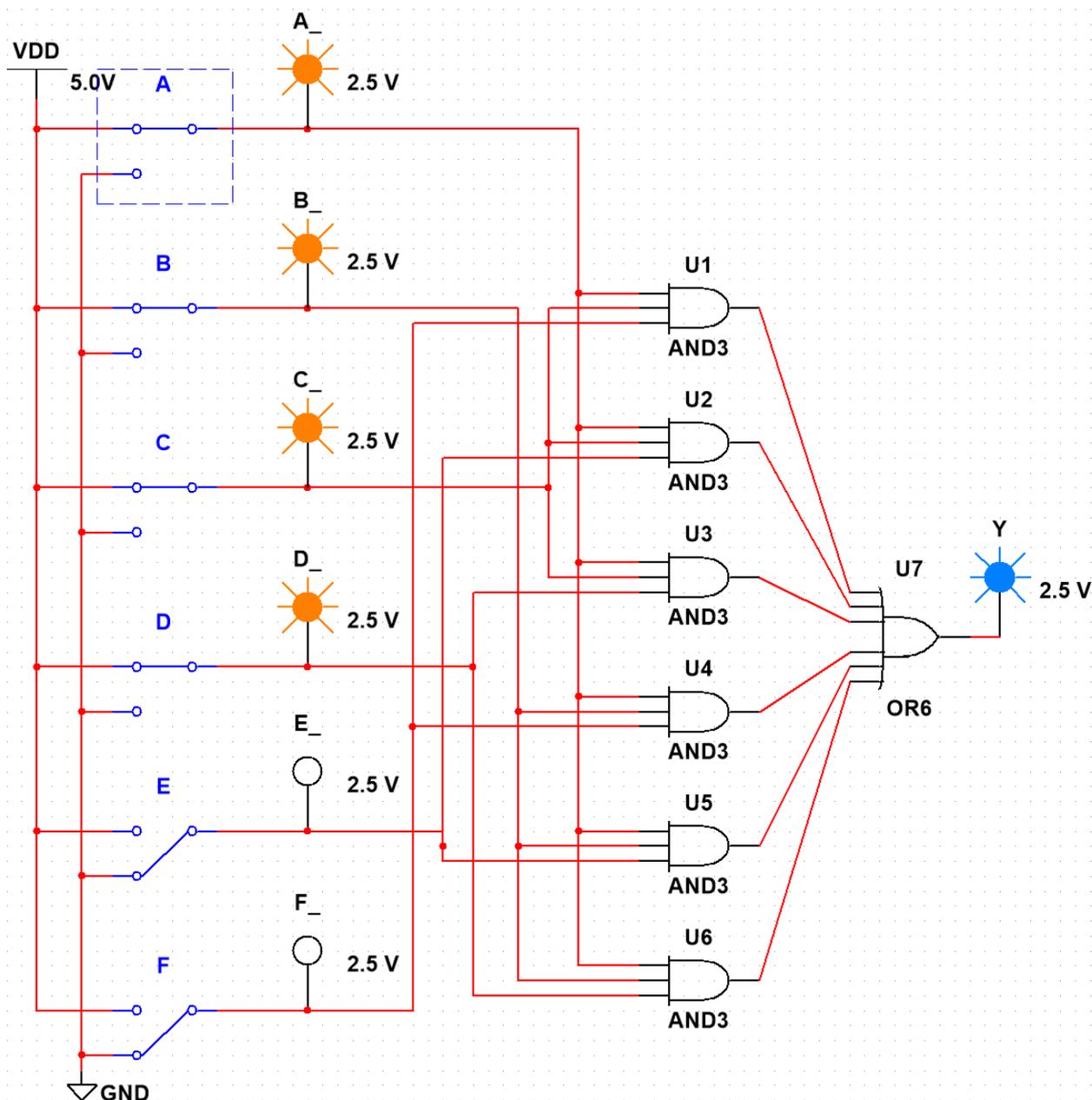


Рисунок 7. Верификация компьютерной модели (набор №60)

Вывод: компьютерная модель сработала правильно (набор №60) – лабораторная работа состоится ($Y = 1$), поскольку работоспособна электросеть ($A = 1$), работоспособны обе муфельные электропечи ($B = C = 1$), работоспособен первый прокатный стан ($D = 1$).

Список литературы:

1. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. Том. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учебник для вузов. – Москва: Металлургия, 1988. – 680 с.
2. Красовский А.Б., Соболев В.А. Проектирование комбинационных цифровых устройств: методические указания. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 27 с.

3. Соболев В.А., Соловьев В.А. Проектирование дискретного комбинационного цифрового устройства на интегральных микросхемах: учебно-методическое пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. – 70 с.

References:

1. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. et al. Machines and aggregates of metallurgical plants. Vol. 3. Machines and units for the production and finishing of rolled products: textbook for universities. – Moscow: Metallurgy, 1988. – 680 p.
2. Krasovsky A.B., Sobolev V.A. Design of Combination Digital Devices: suggestions for teaching. – Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2012. – 27 p.
3. Sobolev V.A., Soloviev V.A. Design of a discrete combinational digital device on integrated circuits: an educational and methodical manual. – Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2022. – 70 p.