

Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 2 (107). С. 16–30.
Cherepovets State University Bulletin, 2022, no. 2 (107), pp. 16–30.

Научная статья

УДК 519.876.5

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-2-107-2>

Моделирование дискретных систем управления на основе автоматов Мили и Мура в САПР Proteus 8

Константин Аркадьевич Харахнин

Череповецкий государственный университет,
Череповец, Россия,
kakharakhnin@chsu.ru

Аннотация. В ходе работы выполнены проектирование и моделирование дискретных систем управления на основе автоматов Мили и Мура в САПР Proteus 8. Рассмотрены функциональные возможности VSM (Virtual Simulation Environment) виртуальной среды моделирования Proteus Design Suite компании Labcenter Electronics. Подтверждается целесообразность ее использования для построения моделей и отладки дискретных систем.

Ключевые слова: дискретные системы управления, моделирование, САПР Proteus 8

Для цитирования: *Харахнин К. А.* Моделирование дискретных систем управления на основе автоматов Мили и Мура в САПР Proteus 8 // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 2 (107). С. 16–30. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-2-107-2>.

Modeling discrete control systems based on Mealy and Moore machines in Proteus 8 CAD

Konstantin A. Kharakhnin

Cherepovets State University,
Cherepovets, Russia,
kakharakhnin@chsu.ru

Abstract. In the course of the works, discrete control systems based on Mealy and Moore machines in Proteus 8 CAD have been designed and modeled. The author analyzes functional capabilities of the VSM (virtual simulation environment) of the Proteus Design Suite virtual modeling environment by Labcenter Electronics. Its application is considered to be useful for developing models and testing discrete systems.

Keywords: discrete control systems, modeling, CAD Proteus 8

For citation: *Kharakhnin K. A.* Modeling discrete control systems based on Mealy and Moore machines in Proteus 8 CAD. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 2 (107), pp. 16–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-2-107-2>.

Введение

При проектировании дискретных и цифровых систем управления (далее – СУ) важным является этап моделирования, обеспечивающий разработку критериев и моделей описания и оценки эффективности реализации задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации. На данном этапе могут быть выявлены как аппаратные, так и программные ошибки в системе, определены оптимальные параметры ее работы, проведено исследование ее функционирования при различных входных и возмущающих воздействиях.

Основным элементом современных инструментальных средств отладки служит виртуальная среда моделирования VSM (Virtual Simulation Environment). Отладка в виртуальной среде позволяет избежать целого ряда ошибок, которые могли бы при работе на реальном оборудовании привести к авариям. В то же время VSM способствует проведению визуализации и анализа информации на основе компьютерных методов обработки данных.

Одной из современных программных сред проектирования дискретных и цифровых систем, обладающих широкими возможностями и характеристиками VSM, является Proteus Design Suite компании Labcenter Electronics¹. САПР (система автоматизированного проектирования) Proteus включает две программы: средство создания и отладки электронных систем в режиме реального времени и средство разработки печатных плат (включая 3D-моделирование). Библиотеки среды проектирования содержат множество различных моделей электронных компонентов, что позволяет проектировать СУ любой сложности. При отладке систем могут использоваться различные виртуальные инструменты: генераторы, осциллографы, логические анализаторы, терминалы последовательных интерфейсов, средства ввода и отображения информации, аналоговые и цифровые микросхемы и другие приборы.

Виртуальная среда VSM позволяет решать следующие задачи:

- выбор элементной базы для системы (однокристальные микроконтроллеры, аналоговые и цифровые микросхемы);
- разработка программного обеспечения;
- осуществление отладки работы системы (в том числе в пошаговом режиме);
- создание электрических принципиальных схем и печатных плат.

Основная часть

В работе выполнены проектирование и моделирование дискретных систем управления на основе автоматов Мили и Мура в САПР Proteus 8.

Математической моделью дискретной системы является абстрактный автомат, который задается совокупностью пяти объектов²:

$$S = (X, Y, A, \delta, \lambda), \quad (1)$$

¹ Proteus Design Suite. Getting Started Guide. URL: <https://labcenter.s3.amazonaws.com/downloads/Tutorials.pdf> (дата обращения: 15.01.2022).

² Захаров Н. Г., Рогов В. Н. Синтез цифровых автоматов. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 135 с.

где $\{X\}$ и $\{Y\}$ – множества значений на физических входах и выходах автомата соответственно; $\{A\}$ – множество внутренних состояний автомата; δ – функция переходов, обеспечивающая выработку последующего состояния автомата в зависимости от существующего состояния и входного сигнала; λ – функция выходов, позволяющая осуществлять выработку выходного сигнала автомата в зависимости от его состояния.

Если множества $\{X\}$; $\{Y\}$; $\{A\}$ конечны, то автомат называется конечным автоматом. Он функционирует дискретно по времени, значения входов, выходов и его внутреннее состояние изменяются в дискретные моменты времени. В большинстве дискретных и цифровых систем управления технологические процессы и оборудование используют датчики-энкодеры, формирующие серию прямоугольных импульсов, связанных с такими технологическими параметрами, как угловая частота вращения, линейная скорость, длина вырабатываемой продукции. Вычислительные устройства систем должны быть синхронизированы импульсами датчиков-энкодеров. В этих случаях целесообразно создание систем на основе автоматов.

Наибольшее распространение получили два типа автоматов¹:

- автоматы Мили, описываемые системой уравнений:

$$\begin{cases} A(t+1) = \delta(A(t), X(t)) \\ Y(t) = \lambda(A(t), X(t)) \end{cases}; \quad (2)$$

- автоматы Мура, которые могут быть представлены с помощью выражений:

$$\begin{cases} A(t+1) = \delta(A(t), X(t)) \\ Y(t) = \lambda(A(t)) \end{cases}, \quad (3)$$

где $A(t)$ – текущее состояние автомата; $A(t+1)$ – следующее состояние автомата; $X(t)$ – текущий входной сигнал; $Y(t)$ – текущий выходной сигнал автомата.

Обобщенная функциональная схема автомата Мили представлена на рис. 1.

¹ Харрис Д. М., Харрис С. Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. URL: <https://goo.su/9Efqs> (дата обращения: 15.01.2022).

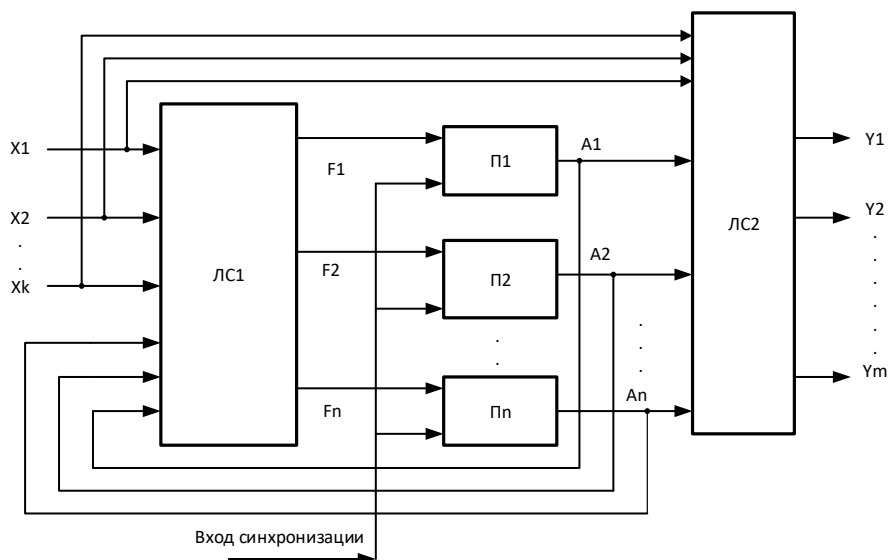


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема автомата Мили

Условные обозначения, использованные на рис. 1: $X_1, \dots, X_k$ – входные сигналы; $Y_1, \dots, Y_m$ – выходные сигналы; ЛС1, ЛС2 – комбинационные логические схемы; П1, ..., Пn – элементы памяти; $F_1, \dots, F_n$ – сигналы управления элементами памяти; $A_1, \dots, A_n$ – текущие состояния выходов элементов памяти.

Выполним проектирование и моделирование дискретной системы управления объектом, которая включает датчик импульсов D_i (выдает 1 импульс за один оборот вала механизма), позиционный датчик D_1 и три исполнительных элемента – электромагнитные клапаны EL_1, EL_2, EL_3 . Работа (алгоритм) СУ зависит от состояния D_1 и описывается временными диаграммами (см. рис. 2).

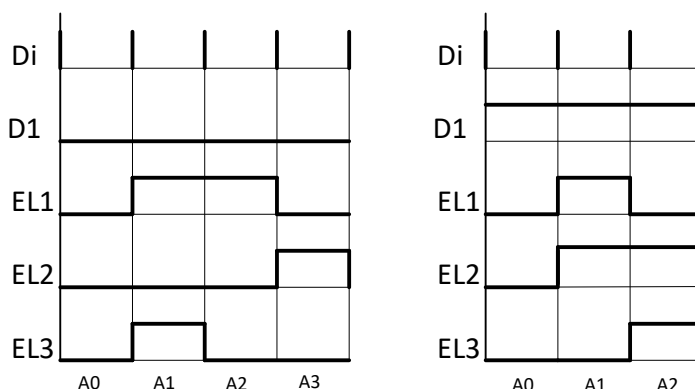


Рис. 2. Временные диаграммы работы дискретной системы

В случае если сигнал $D_1 = 0$, дискретная система управления характеризуется четырьмя состояниями работы: A_0, A_1, A_2 и A_3 . При $D_1 = 1$ имеют место три рабочих

состояния: $A0$, $A1$ и $A2$. Определим необходимое количество элементов памяти для системы, используя выражение:

$$n = \lceil \log_2 (\max N) \rceil = 2, \quad (4)$$

где N – максимальное число состояний (в нашем случае $N = 4$). Таким образом, для реализации дискретной системы управления понадобится два элемента памяти. Для проектируемой СУ будем использовать два RS-триггера (обозначены как $T2$ и $T1$). Граф состояний СУ и кодирование состояний представлены на рис. 3 и в табл. 1.

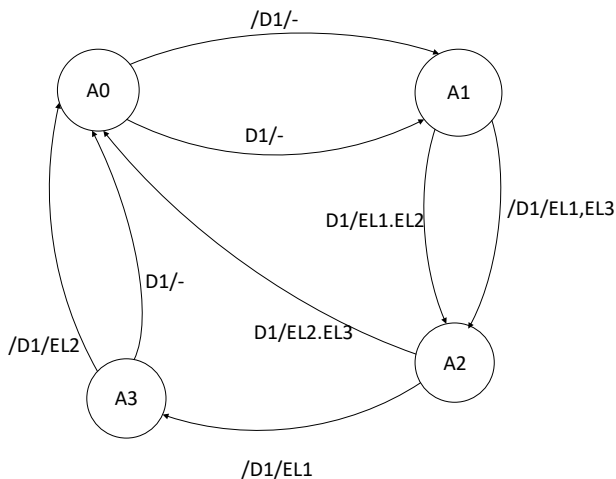


Рис. 3. Граф состояний системы управления

Таблица 1

Кодирование состояний системы управления

$A(t)$	$T2$	$T1$
$A0$	0	0
$A1$	0	1
$A2$	1	1
$A3$	1	0

На рис. 3 при переходах системы из одного состояния в другое в числителе показан входной сигнал $D1$, в знаменателе – выходные сигналы, подаваемые на электромагнитные клапаны $EL1$, $EL2$, $EL3$.

Функциональная схема проектируемой дискретной системы управления изображена на рис. 4.

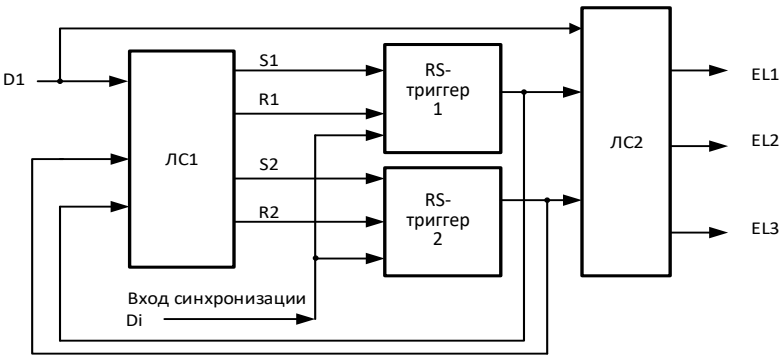


Рис. 4. Функциональная схема проектируемой системы

Составим структурную табл. 2, в которой отразим зависимости выходных сигналов, подаваемых на электромагнитные клапаны, сигналов управления RS-триггерами от состояния датчика $D1$ и от текущего и последующих состояний сигналов на выходе триггеров $T2$ и $T1$. Запишем систему логических функций (5) для сигналов управления RS-триггерами, а также для выходных сигналов системы, подаваемых на электромагнитные клапаны $EL1, EL2, EL3$.

Таблица 2

Зависимости выходных сигналов, сигналов управления RS-триггерами от состояний датчика $D1$ и сигналов на выходе триггеров $T2$ и $T1$

Переход	Исходное состояние	Код исходного состояния		Следующее состояние	Код следующего состояния		Входной сигнал	Выходные сигналы			Сигналы управления триггерами	
		$T2$	$T1$		$T2$	$T1$		$EL1$	$EL2$	$EL3$	$R2$ $S2$	$R1$ $S1$
1	$A0$	0	0	$A1$	0	1	$\overline{D1}$	0	0	0	00 10	01
2	$A1$	0	1	$A2$	1	1	$\overline{D1}$	1	0	1	01	00 01
3	$A2$	1	1	$A3$	1	0	$\overline{D1}$	1	0	0	00 01	10
4	$A3$	1	0	$A0$	0	0	$\overline{D1}$	0	1	0	10	00 10
5	$A0$	0	0	$A1$	0	1	$D1$	0	0	0	00 10	01
6	$A1$	0	1	$A2$	1	1	$D1$	1	1	0	01	00 01
7	$A2$	1	1	$A0$	0	0	$D1$	0	1	1	10	10
8	$A3$	1	0	$A0$	0	0	$D1$	0	0	0	10	00 10

$$\left\{ \begin{array}{l} R2 = T2 \cdot \overline{T1} \cdot \overline{D1} + T2 \cdot T1 \cdot D1 + T2 \cdot \overline{T1} \cdot D1 \\ S2 = \overline{T2} \cdot T1 \cdot \overline{D1} + \overline{T2} \cdot T1 \cdot D1 \\ R1 = T2 \cdot T1 \cdot \overline{D1} + T2 \cdot T1 \cdot D1 \\ S1 = \overline{T2} \cdot \overline{T1} \cdot \overline{D1} + \overline{T2} \cdot \overline{T1} \cdot D1 \\ EL1 = \overline{T2} \cdot T1 \cdot \overline{D1} + T2 \cdot T1 \cdot \overline{D1} + \overline{T2} \cdot T1 \cdot D1 \\ EL2 = T2 \cdot \overline{T1} \cdot \overline{D1} + \overline{T2} \cdot T1 \cdot D1 + T2 \cdot T1 \cdot D1 \\ EL3 = \overline{T2} \cdot T1 \cdot \overline{D1} + T2 \cdot T1 \cdot D1 \end{array} \right. . \quad (5)$$

Используя законы алгебры, мы преобразовали систему логических функций (5) в систему (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} R2 = T2 \cdot (\overline{T1} + D1) \\ S2 = \overline{T2} \cdot T1 \\ R1 = T2 \cdot T1 \\ S1 = \overline{T2} \cdot \overline{T1} \\ EL1 = T1 \cdot (\overline{T2} + \overline{D1}) \\ EL2 = T2 \cdot \overline{T1} \cdot \overline{D1} + T1 \cdot D1 \\ EL3 = \overline{T2} \cdot T1 \cdot \overline{D1} + T2 \cdot T1 \cdot D1 \end{array} \right. . \quad (6)$$

Система выражений (6) является основой для синтеза СУ (см. рис. 5). В качестве RS-триггеров в схеме использованы JK-триггеры ($T2$ и $T1$), синхронизируемые импульсами прямоугольной формы, подаваемыми с выхода генератора PULS (Di).

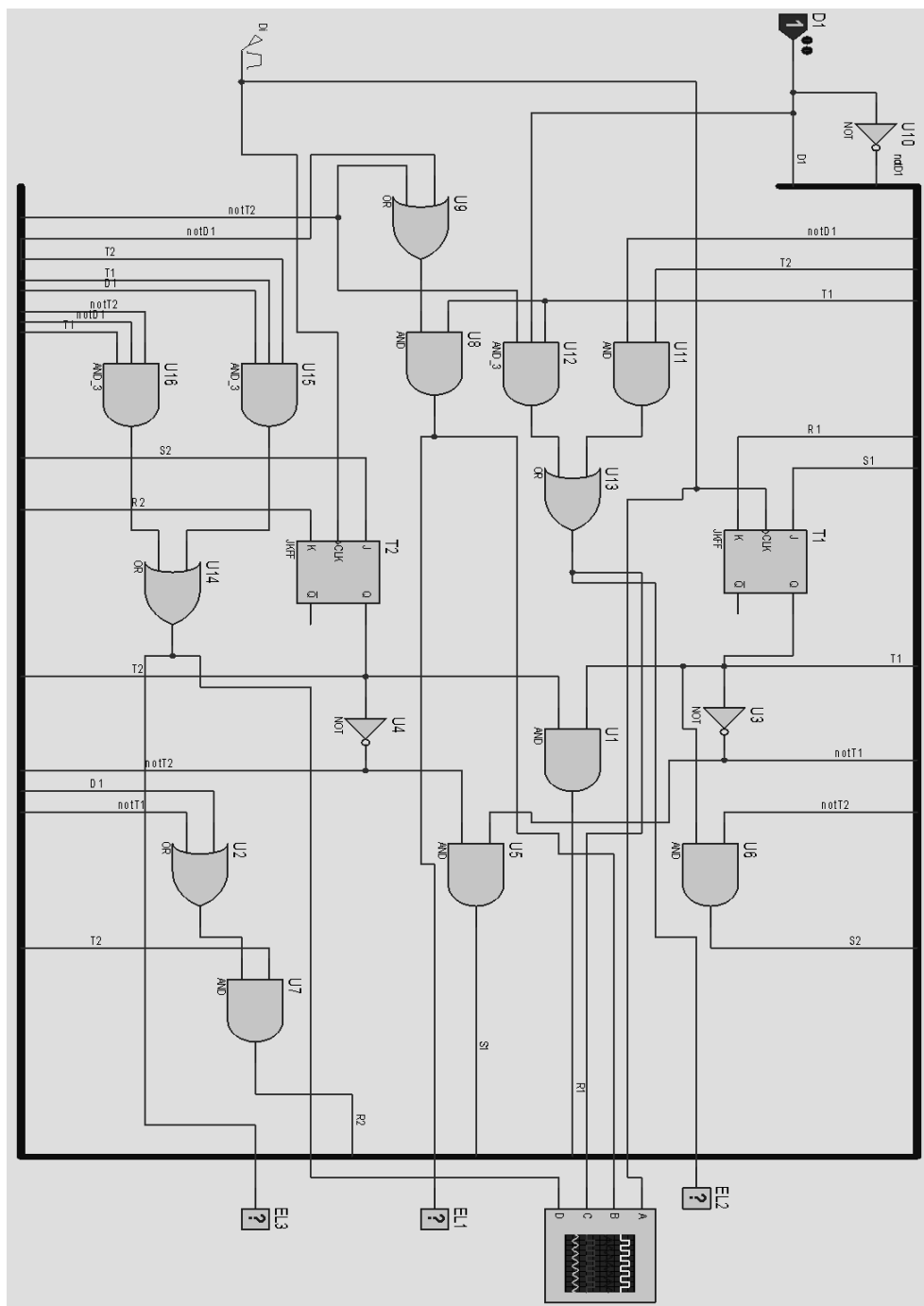


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема, синтезированная на основе выражений (6) в Proteus 8

Датчик $D1$ промоделирован с использованием элемента LOGICSTATE, позволяющего устанавливать состояние 0 или 1. Логические элементы И, ИЛИ, НЕ выбирались из библиотек САПР с применением команды PLACE > COMPONENT > FROM LIBRARYS. Для моделирования сигналов на электромагнитные клапаны $EL1$, $EL2$, $EL3$ использовался элемент LOGICPROBE, позволяющий отображать состояние выходных элементов системы.

Для визуализации результатов моделирования был применен четырехканальный осциллограф из базы виртуальных инструментов PLACE > VIRTUAL > INSTRUMENT > OSCILLOSCOPE. Результаты моделирования синтезированной дискретной системы представлены на рис. 6. Работа системы моделировалась при $D1 = 0$ и $D1 = 1$.

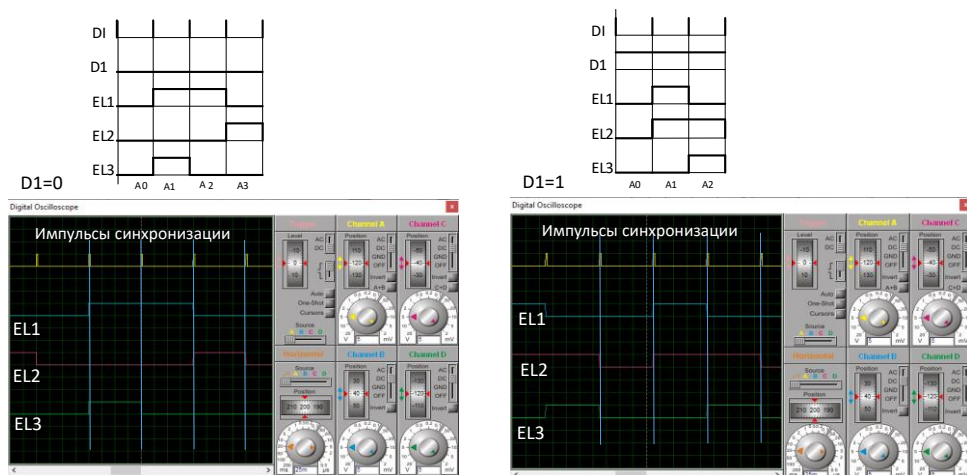


Рис. 6. Результаты моделирования дискретной системы управления
на основе автомата Мили

Исходя из данных осциллограмм очевидно, что разработанная дискретная система полностью реализует заданные функции.

Выполним проектирование и моделирование работы дискретной системы управления на основе автомата Мура. Ее отличительной особенностью является то, что выходные сигналы автомата Мура не зависят от входных сигналов, а являются только функцией состояний системы согласно выражению (3).

Пусть на объекте установлены два дискретных датчика $D1$ и $D2$, а также три исполнительных механизма: два электромагнита $EL1$ и $EL2$ и электродвигатель DV . Работа системы задана алгоритмом, представленным на рис. 7.

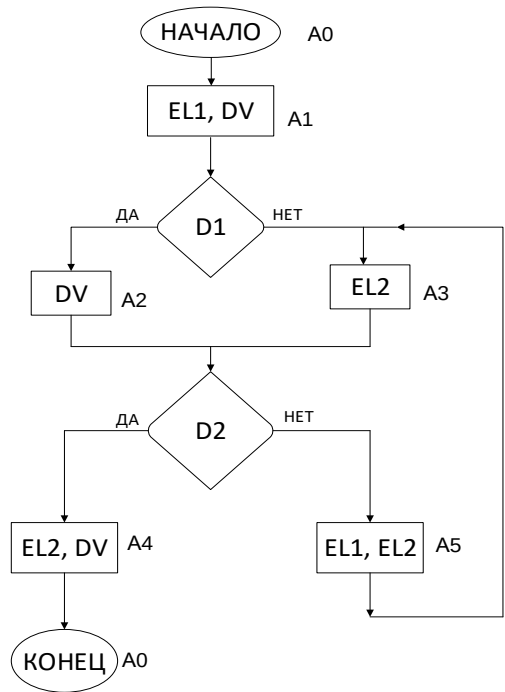


Рис. 7. Алгоритм работы системы

Таблица 3

Кодирование состояний дискретной системы

	Q3	Q2	Q1
A0	0	0	0
A1	0	0	1
A2	0	1	0
A3	0	1	1
A4	1	0	0
A5	1	0	1

В алгоритме показана разметка состояний дискретной системы, а в табл. 3 – кодирование шести состояний. Таким образом, для реализации системы потребуется три элемента памяти, мы будем использовать D-триггеры. Функциональная схема и граф состояний системы представлены на рис. 8 и 9.

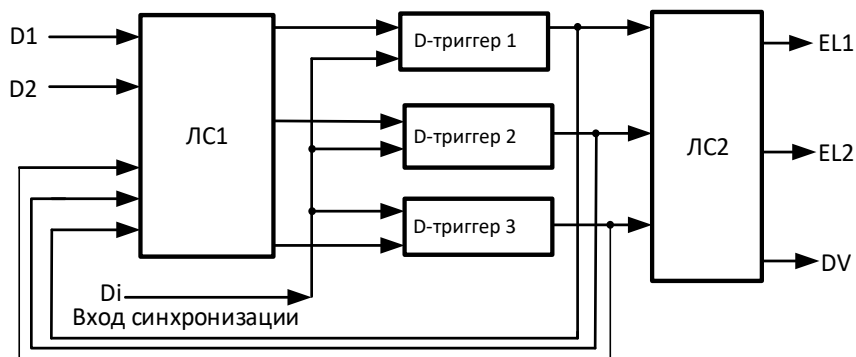


Рис. 8. Функциональная схема проектируемой системы

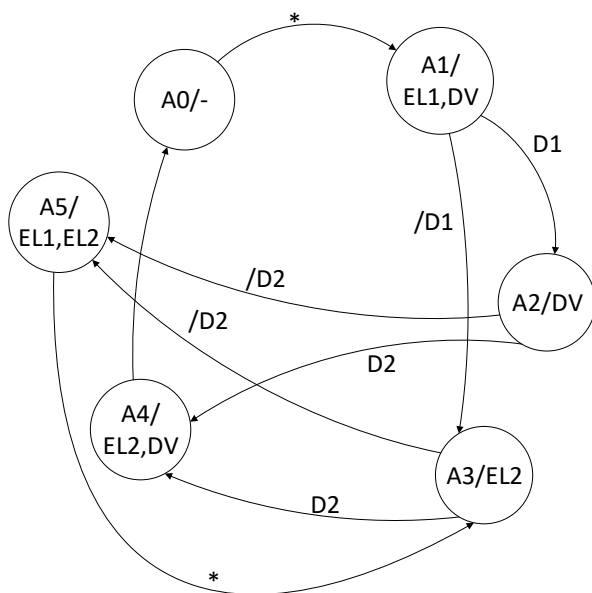


Рис. 9. Граф состояний дискретной системы управления

В числителе указаны номера состояний системы, в знаменателе – сигналы управления, выдаваемые на исполнительные элементы. При переходах из одного состояния в другое изображены прямые и инверсные сигналы датчиков $D1$ и $D2$.

Составим структурную табл. 4, содержащую коды исходного и следующего состояний системы, а также сигналы управления элементами памяти триггерами $D1$, $D2$, $D3$.

Таблица 4

Коды исходного и следующего состояний системы,
а также сигналы управления триггерами D1, D2, D3

№	Исходное состояние	Код исходного состояния			Следующее состояние	Код следующего состояния			Входные сигналы	Выходные сигналы	Сигналы управления триггерами		
		Q3	Q2	Q1		Q3	Q2	Q1			D3	D2	D1
1	A0	0	0	0	A1	0	0	1	*	–	0	0	1
2	A1	0	0	1	A2	0	1	0	D1	EL1, DV	0	1	0
3	A1	0	0	1	A3	0	1	1	/D1	EL1, DV	0	1	1
4	A2	0	1	0	A4	1	0	0	D2	DV	1	0	0
5	A2	0	1	0	A5	1	0	1	/D2	DV	1	0	1
6	A3	0	1	1	A5	1	0	1	/D2	EL2	1	0	1
7	A3	0	1	1	A4	1	0	0	D2	EL2	1	0	0
8	A4	1	0	0	A0	0	0	0	*	EL2, DV	0	0	0
9	A5	1	0	1	A3	0	1	1	*	EL1, EL2	0	1	1

Далее получим выражения и упростим логические функции для сигналов управления триггерами и сигналов управления исполнительными элементами EL1, EL2 и EL3. В результате придем к выражению (7).

$$\left\{ \begin{array}{l} D3 = \overline{Q_3} \cdot Q_2 \\ D2 = \overline{Q_2} \cdot Q_1 \\ D1 = \overline{Q_3} \cdot \overline{Q_2} \cdot (\overline{Q_1} + \overline{D_1}) + \overline{Q_3} \cdot Q_2 \cdot \overline{D_2} + Q_3 \cdot \overline{Q_2} \cdot Q_1 \\ EL1 = \overline{Q_2} \cdot Q_1 \\ EL2 = \overline{Q_3} \cdot Q_2 \cdot Q_1 + Q_3 \cdot \overline{Q_2} \\ DV = \overline{Q_3} \cdot (Q_2 \text{ xor } Q_1) + Q_3 \cdot \overline{Q_2} \cdot \overline{Q_1} \end{array} \right. \quad (7)$$

На основе выражения (7) синтезирована дискретная система управления в Proteus 8. Электрическая принципиальная схема представлена на рис. 10.

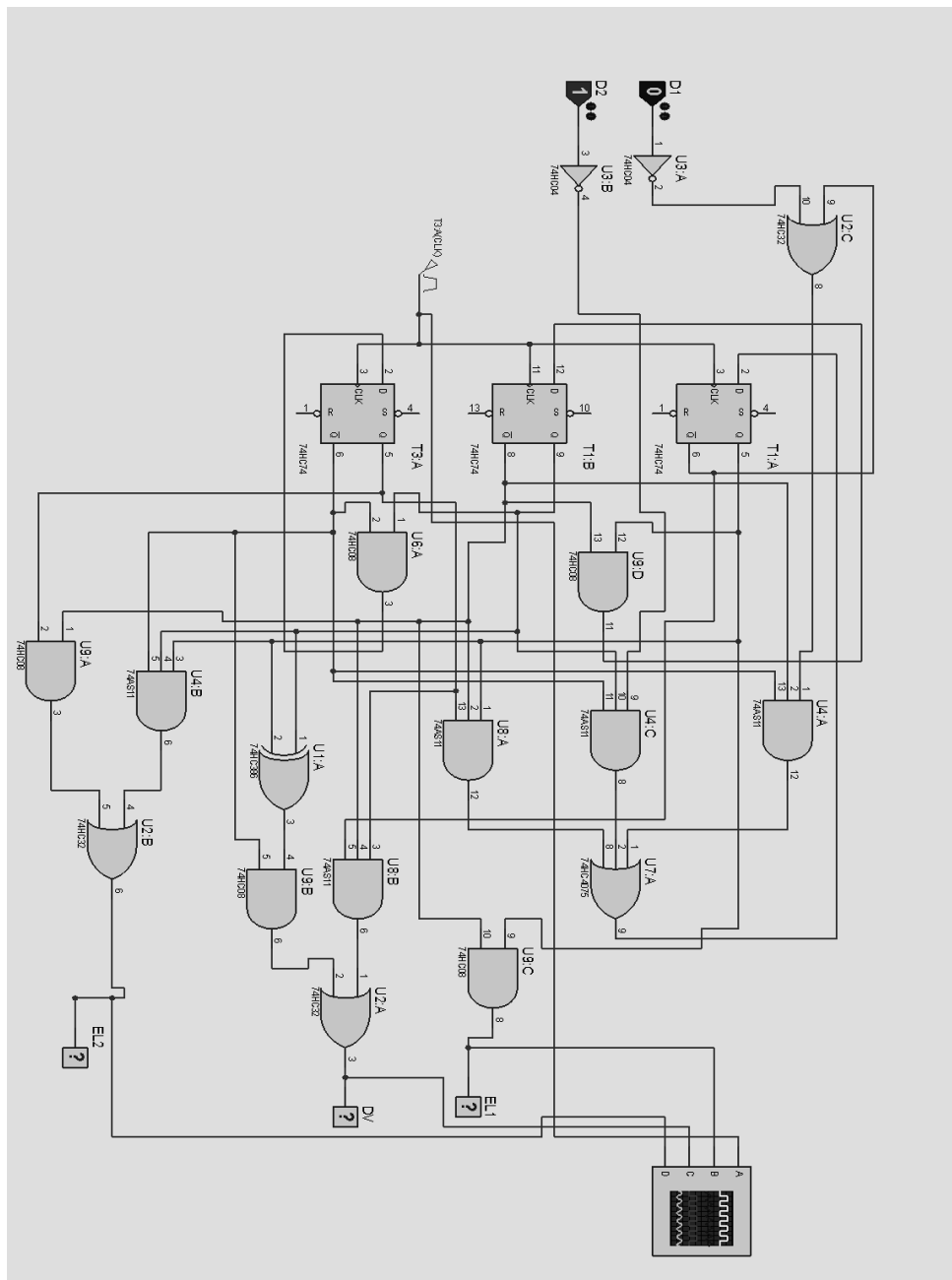


Рис. 10. Электрическая принципиальная схема дискретной системы управления на основе автомата Мура

Результаты моделирования изображены на рис. 11 (при срабатывании датчиков $D1 = 1$, $D2 = 1$). Моделирование продемонстрировало отработку дискретной системой заданного алгоритма функционирования.

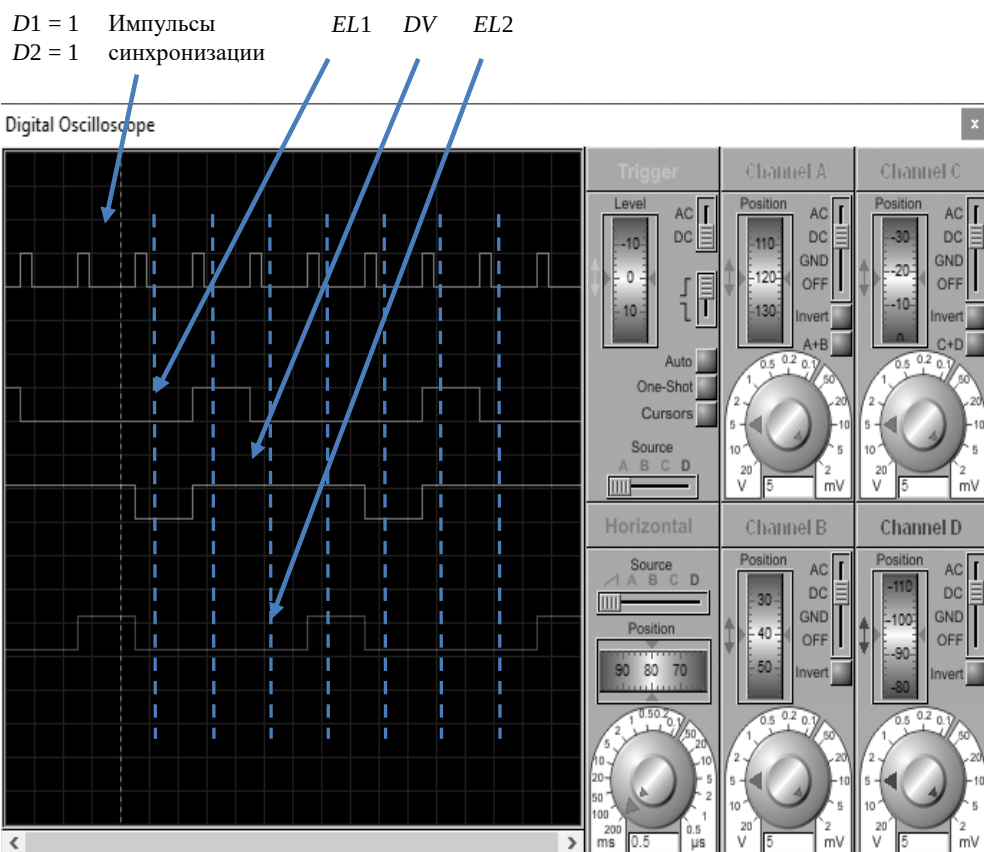


Рис. 11. Результаты моделирования дискретной системы управления на основе автомата Мура

Выводы

В результате проведенного исследования мы пришли к следующим выводам:

- 1) в дискретных и цифровых системах управления вычислительные устройства синхронизируются импульсами датчиков-энкодеров;
- 2) для моделирования и отладки дискретных систем целесообразно использовать VSM виртуальную среду моделирования Proteus Design Suite, имеющую набор виртуальных приборов и большую базу библиотечных элементов;
- 3) доказана эффективность среды Proteus 8 при проектировании и моделировании дискретных систем на основе автоматов Мили и Мура.

Список источников

- Захаров Н. Г., Рогов В. Н. Синтез цифровых автоматов. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 135 с.
Харрис Д. М., Харрис С. Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. URL: <https://goo.su/9Efqs> (дата обращения: 15.01.2022).
Proteus Design Suite. Getting Started Guide. URL: <https://labcenter.s3.amazonaws.com/downloads/Tutorials.pdf> (дата обращения: 15.01.2022).

References

- Zakharov N. G., Rogov V. N. *Sintez tsifrovyykh avtomatov* [Synthesis of digital machines]. Ul'ianovsk: UlGTU, 2003. 135 p.
Kharris D. M., Kharris S. L. *Tsifrovaia skhemotekhnika i arkhitektura komp'iutera* [Digital design and computer architecture]. Available at: <https://goo.su/9Efqs> (accessed: 02.02.2022).
Proteus Design Suite. Getting Started Guide. Available at: <https://labcenter.s3.amazonaws.com/downloads/Tutorials.pdf> (accessed: 02.02.2022).

Сведения об авторах

Константин Аркадьевич Харахнин – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления; kakharakhnin@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 г. Череповец, Россия); **Konstantin A. Kharakhnin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Automation and Control Department; kakharakhnin@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskii, 162600 Cherepovets, Russia).

Статья поступила в редакцию 28.01.2022; одобрена после рецензирования 02.03.2022; принята к публикации 14.03.2022.

The article was submitted 28.01.2022; Approved after reviewing 02.03.2022; Accepted for publication 14.03.2022.