

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

*Кафедра физики твёрдого тела*

**«ТРОИЧНЫЙ ТРИГГЕР НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ С  
МУЛЬТИСТАБИЛЬНОЙ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ»**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ**

Студента 4 курса 4051 группы  
Направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
Института физики

**Незирова Эльдара Ринатовича**

Научный руководитель

д.ф.- м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

17.07.2024 г.

А.А. Семёнов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.- м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2024 год

## Введение

Проблема повышения быстродействия современных микропроцессорных устройств является весьма актуальной в наши дни, поскольку достигать этого за счет уменьшения геометрического размера интегральных элементов становится всё сложнее. [1, 2]. Альтернативный путь, заключающий в себе способ внедрения принципиально новых технологий и материалов, несёт за собой новую задачу по частичному или полному отказу от современной технологии производства.

Вариант с переходом цифровой техники от двоичной к троичной системе счисления позволит получить ряд преимуществ. Актуальность исследования в этой области связано с тем, что переход к трём возможным логическим состояниям – истина, неопределенность и ложь – то есть 1, 0 и -1 обеспечивает следующие преимущества, повышающие производительность микропроцессора: более плотную запись информации, простое представление чисел с отрицательным знаком, ускорение операций ветвления, а также уменьшение количества межсоединений.

Одной из основ современных микропроцессоров является устройства последовательностной логики, обеспечивающие, собственно, потактовое функционирование и «память» цифровых микропроцессорных систем [4]. Упрощение схемотехники отдельных «кирпичиков» цифровой системы и повышение их производительности позволяет как повысить производительность микропроцессора в целом, так и уменьшить количество элементов на кристалле, что может положительно повлиять на увеличение выхода работоспособных кристаллов. В этой связи разработка логических устройств последовательностной логики более простых схемотехнически и более производительных представляется задачей актуальной.

**Целью данной дипломной работы является разработка асинхронного троичного RS-триггера на основе структуры с мультистабильной вольтамперной характеристикой. Для построения модели троичного триггера**

на основе твердотельного структуры с мультитабильной ВАХ был использован пакет САПР Electronics Workbench.

Исходя из поставленной выше цели, в ходе выполнения работы решались следующие задачи:

- Изучить принципы работы элементов с ОДС и особенности построения логических схем на их основе.
- Разработать и исследовать в среде САПР модель структуры металл–окисел–окисел–металл (МООМ) на основе аппроксимации ВАХ.
- Разработать и исследовать в среде САПР модель асинхронного троичного RS-триггера на основе МООМ–структуры с мультитабильной ВАХ.
- Провести численное моделирование работы асинхронного троичного RS-триггера, измерить таблицу переходов и осциллограммы его работы.

Работа занимает 30 страниц и включает в себя 20 рисунков, список использованных источников, состоящий из 14 наименований.

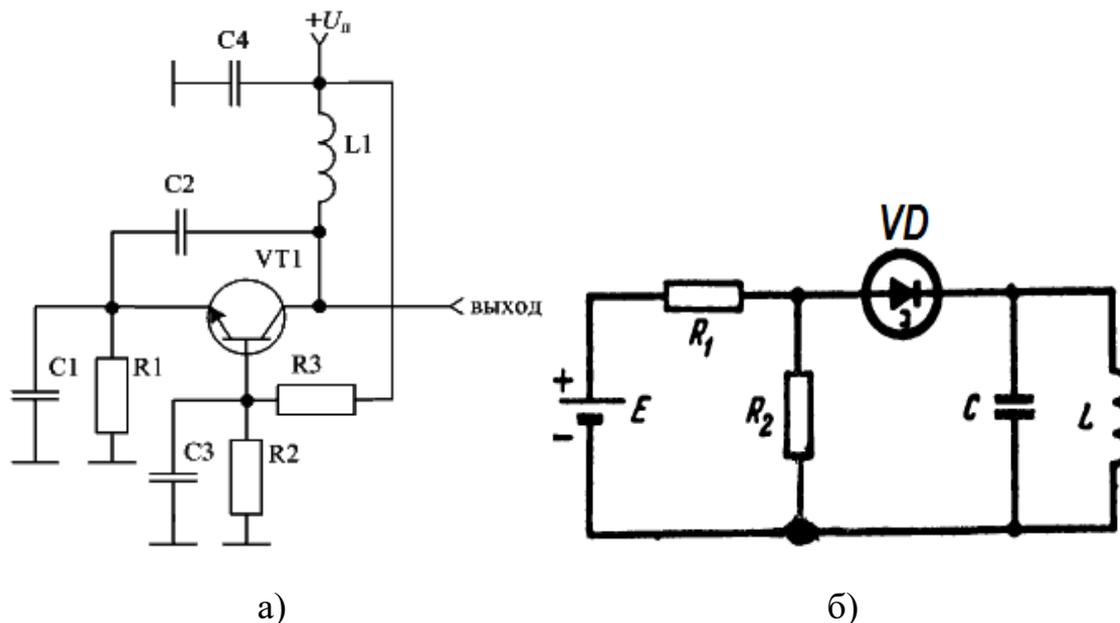
### **Основное содержание работы**

**Во введение** рассматривается актуальность работы, определяется цель и задачи исследования. Описываются преимущества двоичной логики, обосновывается выбор элементной базы.

**Первая глава** посвящена рассмотрению современного состояния технологии создания схем на твердотельных приборах. Выяснено, что схемотехника устройств на приборах с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС), проще их аналогов, выполненных на транзисторах (примеры схем представлены на рис. 1).

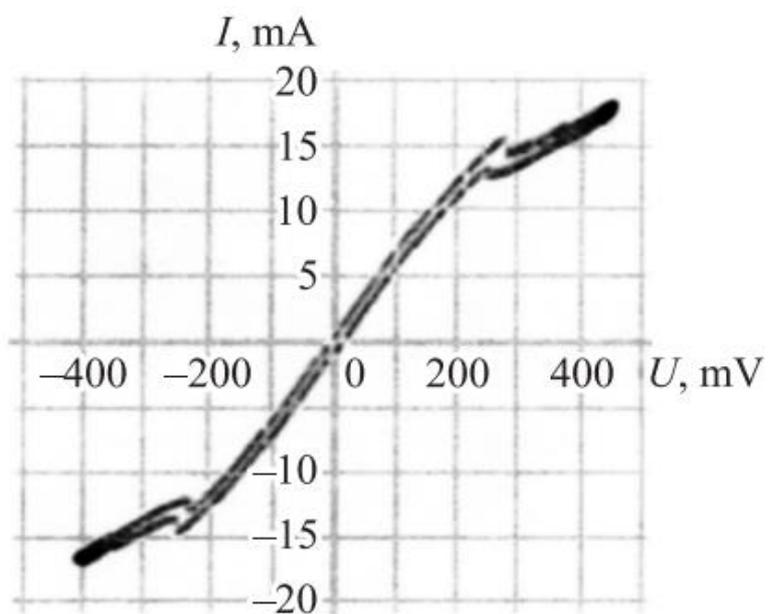
Сотрудниками кафедры физики твёрдого тела СГУ была экспериментально исследована структура МООМ, образованная прижимными контактами электродов из алюминия и цинка с естественными окисными слоями и обладающая несимметричной нелинейной вольтамперной характеристикой с

несколькими участками ОДС N-типа как на положительной ветви, так и на отрицательной [13] (см. рисунки 2 - 4).

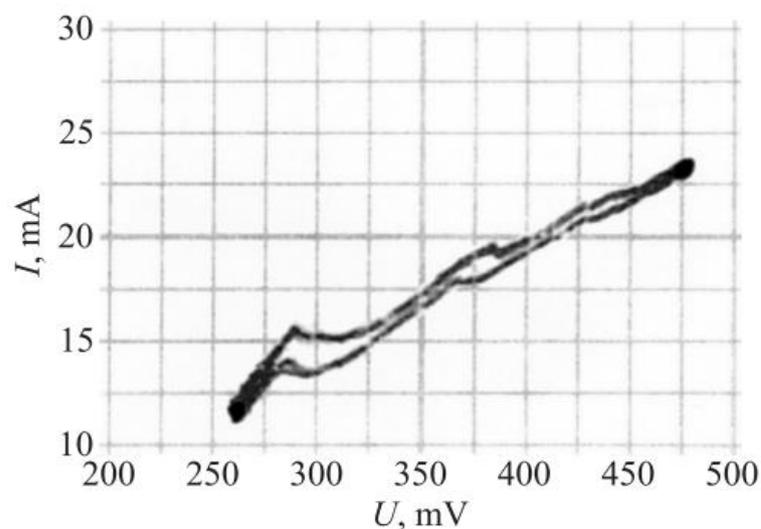


**Рис. 1.** Схемотехника LC-генератора:

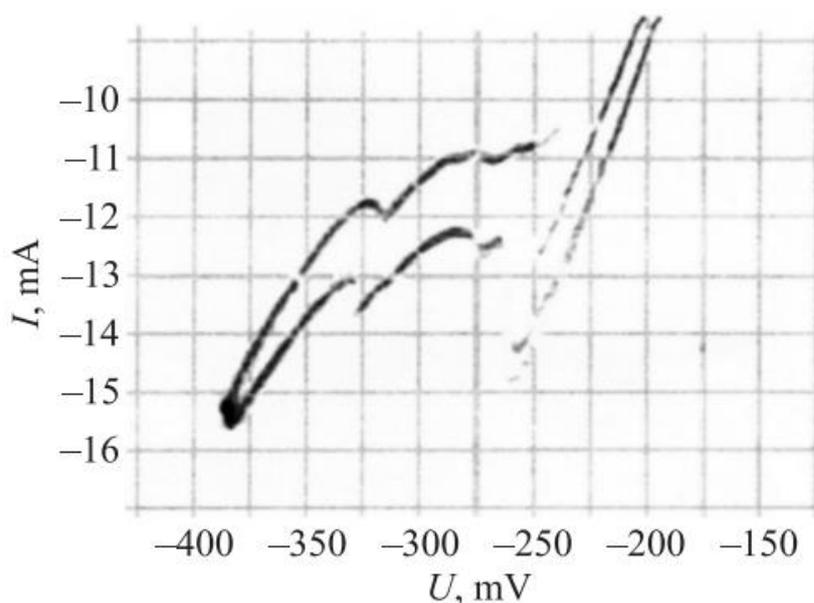
а) на основе транзистора; б) на основе туннельного диода



**Рис. 2.** Экспериментальная ВАХ МООМ-структуры (общий вид)



**Рис. 3.** Положительная ветвь ВАХ МООМ–структуры с участками ОДС



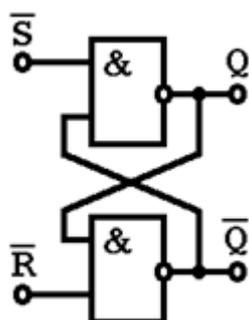
**Рис. 4.** Отрицательная ветвь ВАХ МООМ–структуры с участками ОДС

**Во второй главе** рассмотрены принципы работы двоичных схем последовательного типа.

Сформулированы основные свойства асинхронных RS-триггеров, фиксируются их достоинства и недостатки.

Триггером в двоичной логике принято называть логическое устройство последовательного типа с обратными связями, обладающее двумя состояниями устойчивого равновесия (иначе говоря — бистабильная ячейка). Схема асинхронного RS–триггера на основе логических элементов «И-НЕ» представлена на рис. 5, *a*. Триггер имеет два информационных входа: Set и

**Reset**, и два выхода: **Q** и  $\bar{Q}$ . Он может быть *установлен* активным уровнем логического сигнала по входу **Set**, при этом на выходе **Q** устанавливается логическая «1», или *сброшен* по входу **Reset**, при этом на выходе **Q** — логический «0». Триггер такого типа называют асинхронным, поскольку он может быть установлен или сброшен в любой произвольный момент времени.



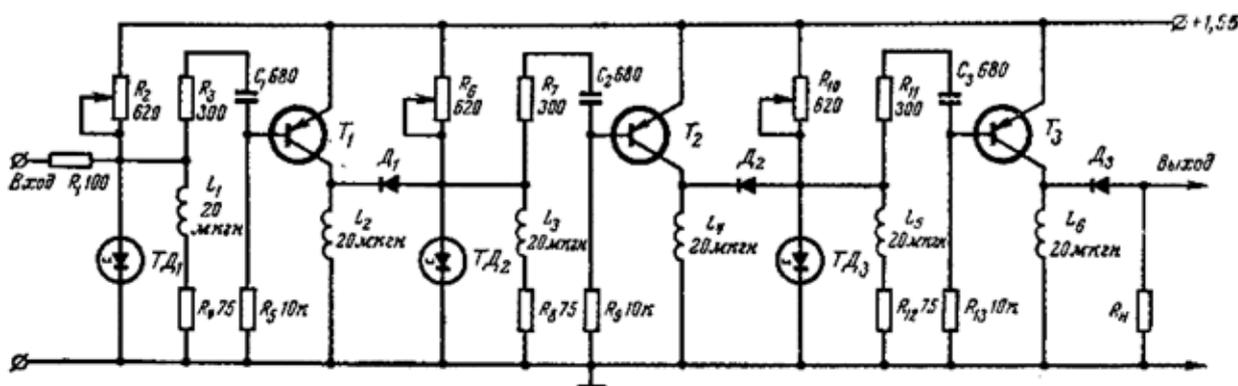
а)

№ изм.	$Q_n$	$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q_{n+1}$
1	1	1	1	1
2	1	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1
5	1	1	1	1
6	1	0	1	1
7	1	1	1	1
8	1	0	0	1

б)

**Рис. 5.** Принципиальная электрическая схема асинхронного двоичного RS-триггера на элементах «И-НЕ» (а) и его таблица переходов (б)

Простой триггер со счетным запуском можно выполнить, используя только один туннельный диод [9].



**Рис. 6.** Пересчетная схема на основе триггеров на одном туннельном диоде

В соответствии с рисунком 6 показана пересчетная схема на 8, в которой работают такие триггеры. Принцип работы триггера заключается в следующем. Последовательно с диодом включен резистор нагрузки ( $R_4$  для первого каскада), сопротивление которого больше среднего отрицательного сопротивления диода. При этом рабочая точка может находиться в двух устойчивых состояниях. В состоянии 0 напряжение на диоде меньше  $U_{\text{макс}}$ , в

состоянии 1 — больше  $U_{мин}$ . Запускающий импульс, поступающий на вход схемы, вызывает колебательный процесс в контуре, образованном сопротивлением нагрузки  $R_4$  индуктивностью  $L_1$  и туннельным диодом. Если рабочая точка находится в состоянии 0, то при увеличении тока через диод до  $I_{макс}$  напряжение на диоде увеличивается скачком до величины, соответствующей состоянию 1.

Следующий импульс также вызывает затухающий колебательный процесс, при котором ток через диод попеременно увеличивается и уменьшается. Если ток уменьшается до  $I_{мин}$ , то напряжение на диоде скачком падает, и рабочая точка вновь возвращается в состояние 0.

**В третьей главе** авторами работы [13] была экспериментально исследована структура металл–окисел–окисел–металл (МООМ), образованная прижимным контактом электродов из алюминия и цинка с естественными окисными слоями и обладающая несимметричной нелинейной вольтамперной характеристикой с несколькими участками ОДС  $N$ -типа, как на положительной, так и на отрицательной ветви. Попытки создания мультистабильного триггерного устройства авторами предпринято не было, хотя такая возможность и обсуждалась.

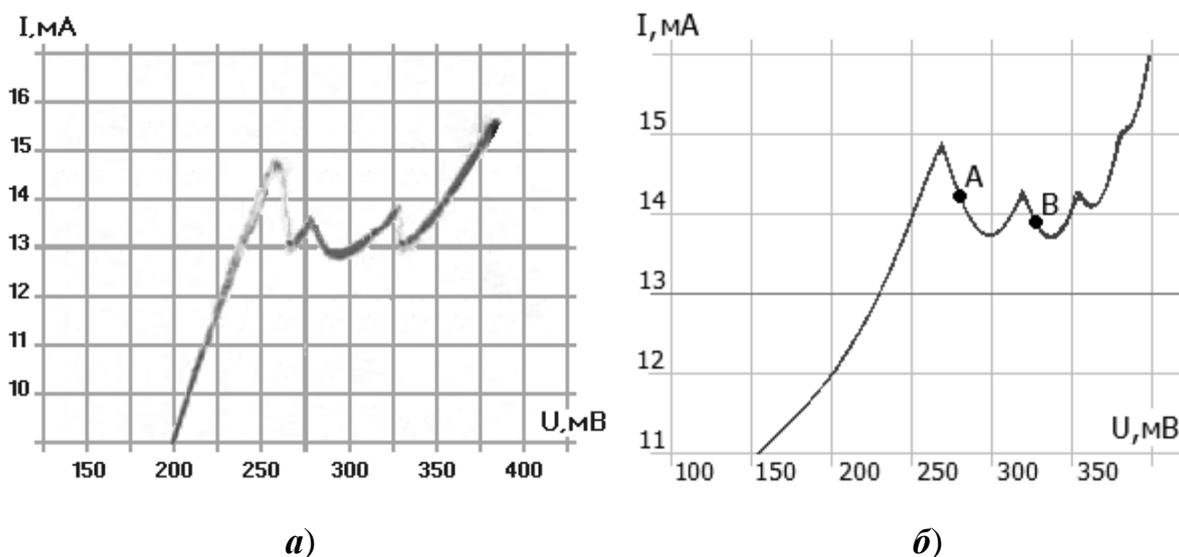
Экспериментальная ВАХ одного из участков мультистабильной структуры МООМ, представленная на рис. 7 а, аппроксимировалась линейной суперпозицией степенного полинома

$$V = (0,0969 + (-0,8698 + (16,282 + (105,33 \cdot U - 77,46) \cdot U) \cdot U) \cdot U), \quad (1)$$

и осциллирующей функции с затухающими амплитудой и периодом

$$V = 1 - |\text{Sin}(600 \cdot U^4)/(600 \cdot U^4)| \quad (2)$$

Коэффициенты в формулах были эмпирически подобраны так, чтобы быстроосциллирующая часть осциллирующей функции соответствовала падающему участку степенного полинома, что в итоге обеспечило хорошее качественное соответствие экспериментальной функции (см. рис. 7 б).



**Рис. 7.** Экспериментальная ВАХ одного из участков мультстабильной структуры МООМ (а) и её аппроксимация (б)

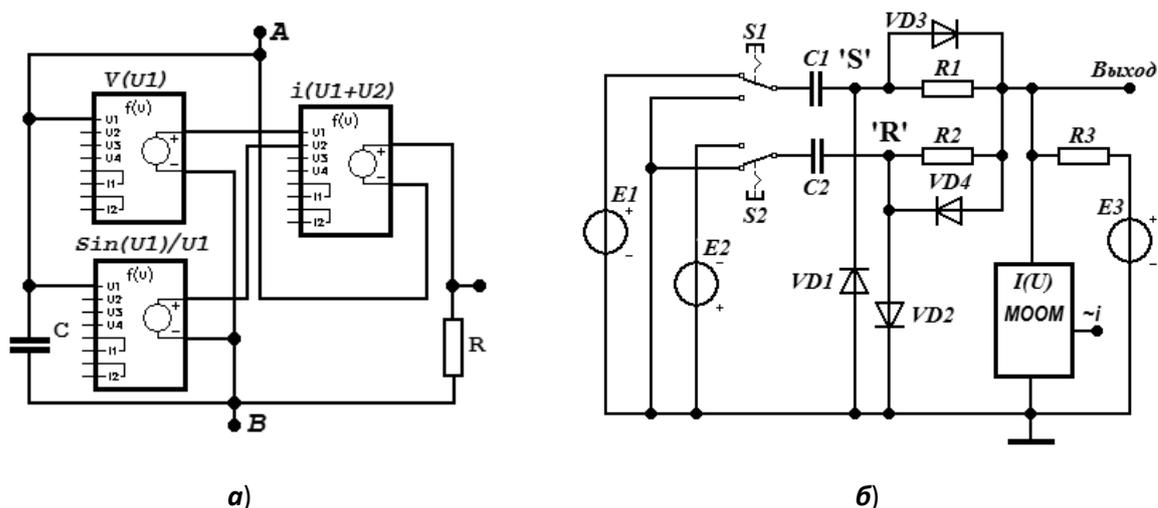
С целью проверки соответствия аппроксимирующей функции экспериментальной ВАХ МООМ структуры в системе автоматического проектирования и моделирования электронных схем [14] была разработана модель генератора по схеме аналогичной схеме генератора на туннельном диоде [9 стр. 22, рис. 13 в].

При выборе напряжении смещения, когда рабочая точка попадала в точки **A** и **B** кривой, аппроксимирующей экспериментальную ВАХ структуры МООМ (рис. 7, б), модель генератора демонстрировала устойчивые автоколебания, как это и наблюдалось экспериментально авторами [13], что свидетельствует о приемлемой количественной точности аппроксимации ВАХ.

В системе САПР [14] модель структуры МООМ была выполнена на основе трёх нелинейных зависимых источников, как показано на рисунке 8, а.

Зависимой переменной первых двух источников являлось « $V$ », и выходной сигнал источника  $V(UI)$  представлял собой напряжение, зависящее от входного сигнала  $UI$  согласно формуле (1). Выходной сигнал зависимого источника, обозначенного на схеме как  $Sin(UI)/UI$ , также представлял собой напряжение, зависящее от входного сигнала  $UI$ , но уже согласно формуле (2). Зависимой переменной третьего зависимого источника, обозначенного на схеме как

$i(U1+U2)$ , являлось «I», следовательно, он формировал выходной сигнал как ток, зависящий от суммы входных сигналов  $U1$  и  $U2$ , сформированных первыми двумя зависимыми источниками напряжения. При этом имелась возможность для более точной аппроксимации ввести в этом зависимом источнике поправочные коэффициенты.



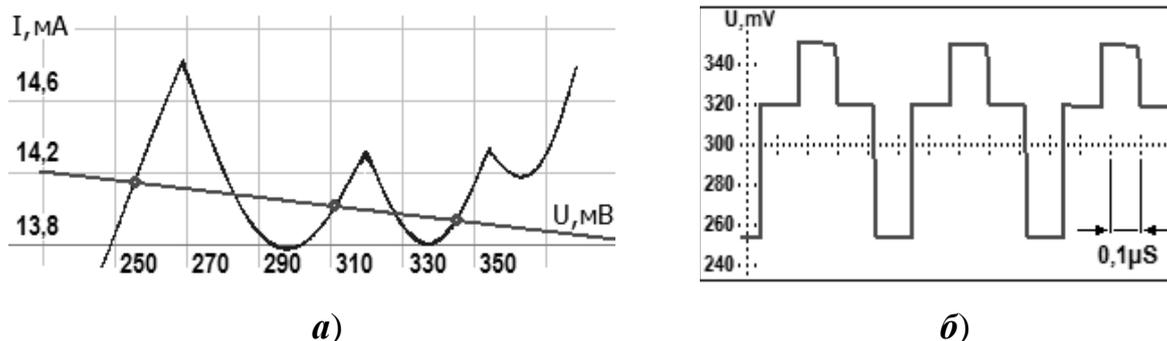
**Рис. 8.** Принципиальные электрические схемы: структуры MOOM с мультстабильной ВАХ (а) и асинхронного RS-триггера на её основе (б)

Емкость  $C$  (2...5 пФ) представляла собой емкостную составляющую структуры, а сопротивление  $R$  — омические потери. Поскольку падение напряжения на этом сопротивлении пропорционально току, проходящему через структуру, его величина была выбрана равной 0,1 Ом для удобства осциллографического наблюдения нелинейной ВАХ структуры.

**В четвёртой главе** представлены результаты экспериментальной проверки получившейся модели троичного триггера на основе MOOM–структуры. Схема самого асинхронного триггера, выполненного на основе структуры MOOM, показана на рисунке 8, б.

Собственно триггером является часть схемы, включающая нелинейный источник тока, управляемый напряжением  $I(U1)$ , олицетворяющий в схеме структуру с мультстабильной ВАХ, токозадающее сопротивление  $R3$  и

источник питания  $E3$ , обеспечивающие положение нагрузочной кривой на вольтамперной характеристике структуры МООМ (рис. 9, *a*).

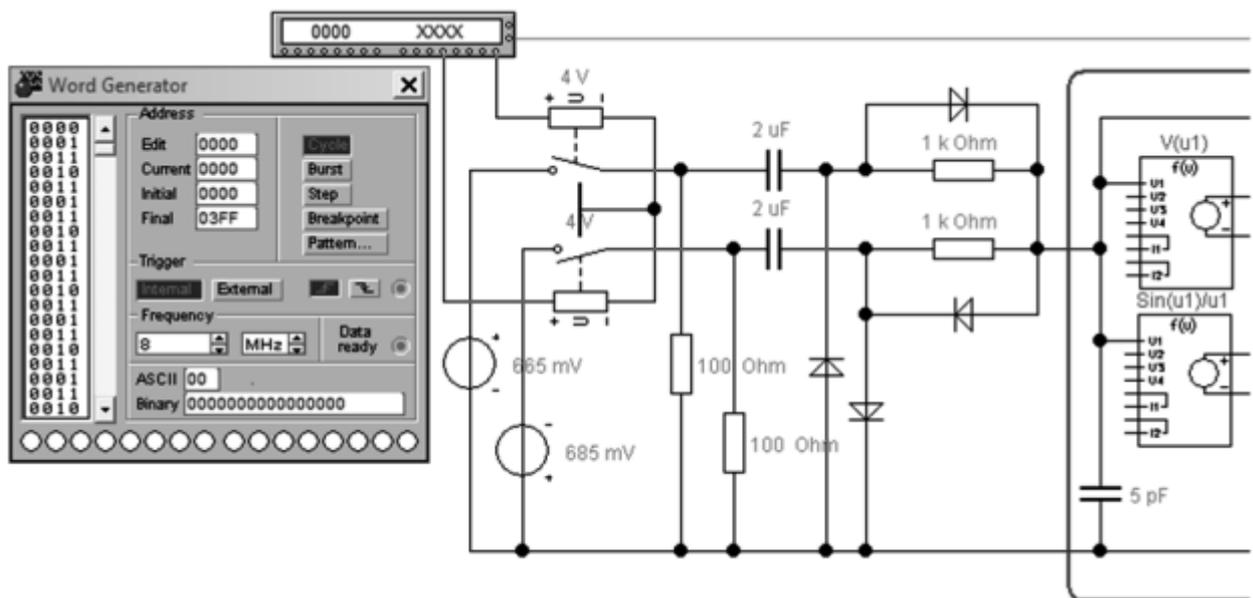


**Рис. 9.** Нагрузочная прямая и устойчивые точки на ВАХ структуры МООМ (*a*), импульсный сигнал на выходе триггера (*б*)

Остальные элементы схемы формируют биполярные импульсные сигналы управления триггером. При нажатии кнопки  $S1$  импульс положительной полярности от источника  $E1$  через конденсатор  $C1$  и диод  $VD3$  поступает на схему триггера и переключает триггер из логического состояния « $-1$ » в состояние « $0$ », или же из логического состояния « $0$ » в состояние « $+1$ ». Если триггер находится в логическом состоянии « $+1$ », данный сигнал влияния не оказывает. Элементы  $R1$  и  $VD1$  осуществляют гашение отрицательного выброса напряжения при размыкании кнопки  $S1$ .

При нажатии кнопки  $S2$  импульс отрицательной полярности от источника  $E2$  через конденсатор  $C2$  и диод  $VD4$  переключает триггер из логического состояния « $+1$ » в состояние « $0$ », или же из логического состояния « $0$ » в состояние « $-1$ », не оказывая влияния в том случае, если триггер находится в логическом состоянии « $-1$ ». Элементы  $R2$  и  $VD2$  осуществляют гашение положительного выброса напряжения при размыкании кнопки  $S2$ .

Для проверки работоспособности модели триггера на основе элемента с мультстабильной ВАХ в динамике кнопки  $S1$  и  $S2$  в схеме на рисунке 8, *б* были заменены переключателями, управляемыми напряжением, а для управления ими был задействован блок формирования последовательностей логических сигналов (рис. 10), входящий в состав САПР [14].



**Рис. 10.** Принципиальная схема блока управления триттером

Сигнал на выходе триттера, формировавшийся при управлении последовательностью импульсов, представлен на рисунке 9, б. Максимальная частота переключения в процессе численного моделирования устройства достигала 8 МГц. Безусловно, быстродействия структуры такого типа было бы достаточно и для больших частот переключения, но ограничения, свойственные используемому пакету САПР [14], не позволили достоверно провести подобное численное исследование.

Таким образом, в процессе проведенной исследовательской работы продемонстрирована возможность создания базового элемента последовательностной логики — асинхронного троичного RS-триггера на основе структуры MOOM, обладающей мультистабильной ВАХ.

## **Заключение.**

В процессе проведенной исследовательской работы были достигнуты следующие результаты:

– Продемонстрирована возможность создания основного элемента последовательностной логики — асинхронного троичного RS-триггера на основе структуры типа MOOM с мультистабильной ВАХ.

– Показано, что схемотехнически асинхронный троичный RS-триггер может быть реализован идентично двоичному RS-триггеру на туннельных диодах.

– Выполнена действующая модель асинхронного троичного RS-триггера на основе структуры типа MOOM с мультистабильной ВАХ в популярной системе автоматического моделирования и проектирования электронных схем.

– Исследовано функционирование асинхронного троичного RS-триггера численными методами, в процессе чего выявлены базовые принципы его работы и особенности.

## Список использованных источников

1. Семёнов А.А., Дронкин А.С. Базовые элементы троичной транзисторно транзисторной логики / Семёнов А.А. // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей девятой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Ал.В. Скрипаля – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2022. С. 52-56.
2. Дронкин А.С., Семёнов А.А. Модели троичных логических элементов и их применение в схемотехнике процессоров / Дронкин А.С. // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей восьмой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Ал.В. Скрипаля. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2021. С. 31-36.
3. Брусенцов Н.П. Блуждание в трех соснах. (Приключения диалектики в информатике). – М.: SvR - Аргус, 2000. – 16 с.
4. Семёнов А.А., Незиров Э.Р., Дронкин А.С. Троичный триггер на основе структуры с мультстабильной вольтамперной характеристикой / Семёнов А.А. // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Ал.В. Скрипаля – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2024. С. 71-76.
5. Филинюк Н.А. Негатроника – достижения и перспективы // Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе». – Баку, 15...17 октября, 1991, С.11-17.
6. Негатроника / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, Н.А. Филинюк и др. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 315 с.
7. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н. Электронные устройства на элементах с отрицательным сопротивлением – М.: Радио и связь, 1992. 200 с.
8. Чжоу В.Ф. Принципы построения схем на туннельных диодах / Чжоу В.Ф. (Перевод с англ. Н.З. Шварца).- М.: «Мир», – 1966, 448 с.

9. *Горюнов Н.Н., Кузнецов А.Ф., Экслер А.А.* Схемы на туннельных диодах / Горюнов Н.Н. - М.-Л., издательство „Энергия”, с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 586). Сводный тематический план „Радиоэлектроника и связь”, № 181, 1965 г., - 80 с.
10. *Климов В.В.* Электронные счетчики на туннельных диодах. – М., «Энергия», – 1968, 43 с.
11. *Дейнеко В.Н., Лосенко А.Н., Пикалевский Л.В. и др.* Туннельно-транзисторный комплекс элементов вычислительных машин. – М.: «Энергия», – 1968, 64 с.
12. *Бондарев А.В., Ефанов В.Н.* Исследование робастности наноэлектронных структур на базе резонансно-туннельных элементов // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 491-507.
13. Семёнов А.А., Усанов Д.А. Вольт-амперные характеристики структур металл-окисел-окисел-металл с несколькими участками отрицательного дифференциального сопротивления / Семёнов А.А. // Письма в ЖТФ, 2008. Т. 34. Вып. 18. С.9-13.
14. *Карлащук В.И.* Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и её применение. – М.: СОЛОН-Пресс, 2016. – 726 с.