

# Мемристорный генератор на триггере Шмитта с несколькими устойчивыми состояниями динамического равновесия

В.В. Ракитин<sup>1,2</sup>, С.Г. Русаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, [iprm@iprm.ru](mailto:iprm@iprm.ru)

<sup>2</sup>ФГУП "НИИ Физических Проблем им. Ф.В. Лукина"

**Аннотация** — Обсуждается принцип действия генератора на триггере Шмитта с мемристором и конденсатором на входе (МС-ТШ). Приведена математическая модель такого генератора. Показано наличие нескольких устойчивых состояний динамического равновесия МС-ТШ. Приведены результаты моделирования МС-ТШ генератора и МС-ТШ одновибратора, подтверждающие выводы анализа. Продемонстрировано биполярное и монополярное управление МС-ТШ одновибратором.

**Ключевые слова** — мемристор, теория мемристивных систем, мемристорные генераторы, триггер Шмитта.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Мемристор – пассивный двухполюсник с сопротивлением, изменяющимся в зависимости от протекающего через него заряда. Фактически это резистор с вольт-амперной характеристикой (ВАХ), зависящей от предистории. Термин мемристор предложен в 1971 году проф. Чуа для описания прибора, электрический заряд которого связан с магнитным потоком [1]. В последующем термин расширен на более широкий класс мемристивных систем [2].

В 2008 году в лаборатории фирмы Хьюлетт-Паккард был создан такой прибор со структурой металл-диэлектрик-металл [3]. С тех пор исследования мемристоров и систем на их основе признаны одним из многообещающих направлений развития электроники.

Мемристоры совместимы с кремниевой КМОП технологией и расширяют возможности систем обработки информации. Предполагается, что областями применения мемристоров станут как системы хранения и обработки информации, так и специальные схемы, в частности, разнообразные генераторы, которые могут использоваться в различных приложениях [4].

К настоящему времени уже известен ряд генераторов, которые используют инерционные и нелинейные свойства мемристоров. Предложены безреактивные мемристорные генераторы, в которых мемристоры позволяют исключить реактивные элементы: конденсаторы и индуктивности [5]. Описаны безиндуктивные генераторы, в которых мемристоры заменяют резисторы: с мостом Вина [6],

фазосдвигающие [7], моностабильные генераторы [8]. Мемристоры в сочетании с конденсаторами и индуктивностями позволяют реализовать широкий класс генераторов хаотических сигналов [9]-[11]. Ряд результатов, полученных при разработке генераторов на мемристорах, приведён в [12].

На основе мемристорных генераторов предполагается создание искусственных нейронов (ИН) нового поколения [13, 14], где мемристоры выполняют функцию энергонезависимой аналоговой памяти, в том числе моделей ИН с синаптической пластичностью [15]. В перспективе ожидается построение мемристивных осцилляторных нейрокомпьютеров [16].

Поскольку мемристоры являются пассивными элементами, то в составе мемристорных генераторов присутствует активные приборы, обеспечивающие усиление сигналов. В настоящей работе обсуждается применение триггера Шмитта в качестве активного элемента с гистерезисной характеристикой.

В работе [17] предложена схема релаксационного генератора на основе триггера Шмитта с пороговым мемристором. Предложенный генератор позволяет программировать частоту генерации за счет управления его сопротивлением внешними сигналами управления. Отметим, что во время генерации сопротивление мемристора в этом случае не меняется.

В отличие от этой работы в настоящей статье предлагается использовать изменение сопротивления мемристора в процессе генерации, что существенно расширяет функциональные возможности схемы.

Целью данной работы является исследование работы генератора, содержащего триггер Шмитта, конденсатор и мемристор [3]. Показано, что обсуждаемая схема может иметь несколько устойчивых состояний динамического равновесия, включая как статические стабильные состояния, так и установившиеся периодические режимы, различающиеся частотой генерируемых импульсов.

Схема с такими свойствами позволяет строить на своей основе ряд схемотехнических элементов, в том числе разные типы искусственных нейронов.

Статья организована следующим образом. В разделе II описан принцип действия

мультистабильного генератора на триггере Шмитта с мемристором и конденсатором на входе. В разделе III приведена математическая модель такого генератора и выполнен анализ схемы с её применением. В разделе IV приведены некоторые результаты моделирования обсуждаемого генератора.

## II. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТРИГГЕРА ШМИТТА С МЕМРИСТОРОМ И КОНДЕНСАТОРОМ НА ВХОДЕ

Ниже на качественном уровне показано, что поведение обсуждаемой схемы генератора на триггере Шмитта с мемристором (МС-ТШ) определяется многими состояниями с устойчивыми режимами работы.

Триггер Шмитта (ТШ) с отрицательной обратной связью имеет гистерезисную входную вольт-амперную характеристику (ВАХ). При подключении к его входу конденсатора он превращается в генератор релаксационных колебаний. При подключении к его входу сопротивления ТШ может работать в различных режимах в зависимости от величины сопротивления. При малом сопротивлении он работает в режиме триггера, при асимметричной входной ВАХ с одним статическим устойчивым состоянием – в режиме одновибратора, при отсутствии устойчивых состояний – в режиме генератора релаксационных колебаний.

Обсуждаемая замена резистора во входной цепи ТШ на мемристор (рис.1) существенно меняет характер работы схемы (далее МС-ТШ). Дополнительная степень свободы в связи с возможностью изменения величины сопротивления мемристора позволяет МС-ТШ совмещать несколько режимов работы. При фиксированных параметрах поведение МС-ТШ и режим работы зависят от начального состояния мемристора  $R_M$  и напряжения  $v$  на конденсаторе  $C$ . В результате функциональные возможности такой схемы расширяются. Одновибратор на МС-ТШ при подаче входных управляющих сигналов можно переводить из устойчивого состояния в режим генерации или в режим формирования пачки импульсов. МС-ТШ генератор может иметь два режима генерации, различающиеся по частоте и скважности выходного сигнала  $v_{out}$ . Таким образом, МС-ТШ становится схемой с несколькими устойчивыми состояниями динамического равновесия.

Для подтверждения указанного свойства ниже обсуждаются принципы работы рассматриваемой схемы с применением линейно-дрейфовой модели мемристора [3]. Модель характеризует изменение проводимости мемристора в зависимости от приложенного к нему напряжения. При положительном напряжении на катоде мемристора, которым он подсоединен к входу ТШ, проводимость мемристора падает до минимального значения  $g_{min}$ , при отрицательном напряжении возрастает до максимальной величины  $g_{max}$ . Учтём в дальнейшем рассмотрении возможность разделения процессов изменения состояния схемы на быстрые и медленные

процессы. Будем считать, что медленные процессы изменения проводимости мемристора существенно более инерционны в сравнении с быстрыми процессами установления напряжения на конденсаторе. Такое предположение вполне оправдано характером работы схемы на практике.

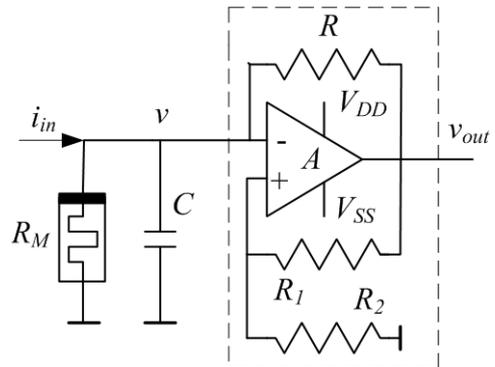


Рис. 1. Электрическая схема МС-ТШ

На рис. 2 приведена иллюстрация графической формы уравнения модели схемы (рис.1) в узле  $v$ . Идеальная петля гистерезиса ТШ на плоскости «входное напряжение – входной ток» ТШ задается двумя точками переключения тока  $S$  и  $s$  и двумя точками нулевого напряжения  $w$  и  $u$ . Нижняя часть петли гистерезиса слева от точки  $S$  соответствует положительному выходному напряжению  $v_{out} = V_{DD}$ , при котором ток вытекает из схемы ТШ. При входном напряжении  $v \geq V_S$  схема переключается, выходное напряжение становится отрицательным  $v_{out} = V_{SS}$  и ток начинает втекать в ТШ, что соответствует верхней части петли гистерезиса с положительным током. Для возвращения на нижнюю петлю требуется, чтобы  $v \leq V_S$ . Далее ограничимся симметричным случаем  $V_{SS} = -V_{DD}$ ,  $V_S = -V_S = R_2 \cdot V_{DD} / (R_1 + R_2)$ ,  $I_S = -I_S$ . Тогда петля гистерезиса характеризуется одной точкой переключения, например, точкой  $S$  с положительным напряжением  $V_S$  и отрицательным током  $-I_S$ , и наклоном петли, который пропорционален проводимости резистора обратной связи  $G = 1/R$ . Выходное напряжение ТШ описывается следующим образом

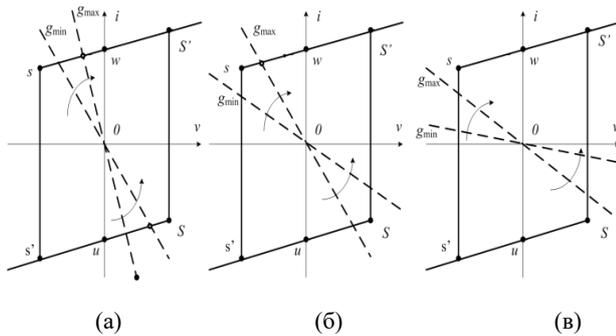
$$v_{out} = \mp V_{DD} = \mp (V_S + I_S / G) . \quad (1)$$

Количество устойчивых состояний МС-ТШ определяется соотношением максимальной и минимальной проводимостей мемристора и пороговой проводимости ТШ  $G_S = I_S / V_S$ . Возможны следующие варианты (рис.2):

$g_{max} > g_{min} > G_S$  - два статических устойчивых состояния: триггерная схема (рис. 2a);

$g_{max} > G_S > g_{min}$  - одно устойчивое состояние: одновибратор - генератор с жестким возбуждением (рис. 2б);

$G_S > g_{max} > g_{min}$  - нет статических устойчивых состояний – генератор с режимами генерации, различающимися по частоте (рис. 2в).



**Рис. 2.** Петля гистерезиса ТШ и режимы работы МС-ТШ: а – бистабильный, б – моностабильный, в – режим генерации

Два устойчивых состояния МС-ТШ триггера различаются знаком входного тока. В первом состоянии при положительном токе текущая проводимость мемристора стремится к  $g_{max}$ , так как напряжение на мемригоре после окончания быстрых процессов отрицательно. Во втором состоянии проводимость мемристора стремится к  $g_{min}$ . В результате для переключения МС-ТШ из первого состояния внешним отрицательным током его амплитуда будет больше, чем амплитуда положительного тока для переключения из второго состояния в первое.

В состоянии с положительным током напряжение на мемригоре отрицательно. Но при подаче на него дополнительного положительного тока можно изменить знак напряжения на мемригоре, а значит, и повлиять на его проводимость. Другими словами, длительный положительный входной сигнал снижает порог переключения. Порог переключения снижается в течение некоторого времени при переключении из состояния с отрицательным током. Таким образом, порог переключения МС-ТШ триггера зависит от предистории, в том числе он может быть изменен при сохранении его состояния, что расширяет функциональные возможности систем на таких элементах. Например, система из МС-ТШ триггеров может допускать временную настройку порогов без изменения выходных сигналов.

В устойчивом состоянии через МС-ТШ одновибратор протекает положительный ток, поскольку при отрицательном токе после окончания быстрых процессов напряжение на мемригоре положительно, проводимость уменьшается, и схема покидает нижнюю ветку гистерезисной петли. После этого одновибратор может вернуться в устойчивое состояние (заторможенное с  $g = g_{max}$ ), но может перейти, как показано далее, в режим стабильной генерации. При такой генерации проводимость мемристора будет близка к  $g_{min}$ . Таким образом, МС-

ТШ одновибратор является схемой, обладающей двумя состояниями: устойчивым заторможенным состоянием и состоянием генерации. Возбуждение может достигаться как коротким по времени отрицательным импульсом тока, так и длинным положительным импульсом. Механизм поведения аналогичен работе МС-ТШ триггера. Прекращение генерации также может осуществляться как коротким положительным импульсом, так и длинным отрицательным импульсом входного тока. Еще одной особенностью является длительный период перехода между состояниями, поскольку скорость изменения проводимости мала. Так, возбужденная схема может вернуться в устойчивое заторможенное состояние после большого количества колебаний. Зависимость количества колебаний от возбуждающего или тормозящего воздействия позволяет говорить о возможности аналого-цифрового преобразования. В переходном процессе поведение МС-ТШ аналогично инерционному звену с большой постоянной времени. Это позволяет интегрировать асинхронные внешние воздействия и формировать внешний выходной сигнал при превышении некоторой пороговой величины. МС-ТШ одновибратор является простой моделью спайкового нейрона, т.е. искусственного нейрона генерирующего пачки импульсов.

Если у заторможенного МС-ТШ одновибратора уменьшить проводимость  $g_{max}$  ниже значения  $G_S$ , то схема перейдет в режим генерации, сохраняя проводимость близкую к  $g_{max}$ . Такой режим назовем заторможенной генерацией. Наряду с этим МС-ТШ генератор, как и МС-ТШ одновибратор, может находиться в режиме генерации с проводимостью мемристора, близкой к минимальной  $g_{min}$ . Особенностью МС-ТШ генератора является наличие длительного процесса перехода между заторможенной и возбужденной генерацией под действием внешнего сигнала. Эта возможность сильно зависит от величины сопротивления в обратной связи ТШ. Как и в предыдущих случаях, переход между режимами генерации может осуществляться двумя способами: изменением заряда на конденсаторе коротким входным сигналом и изменением проводимости мемристора входным сигналом большой длительности. Указанные режимы генерации отличаются не только постоянной составляющей проводимости, но и частотой генерации. МС-ТШ является простой моделью генерирующего нейрона - искусственного нейрона с частотным представлением информации.

### III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АНАЛИЗ ГЕНЕРАТОРА НА ТРИГГЕРЕ ШМИТТА С МЕМРИСТОРОМ

Исходное уравнение для узлового напряжения  $v$  (рис. 2) имеет следующий вид

$$C \frac{dv}{dt} = G(v_{out} - v) - g \cdot v + i_{in}, \quad (2)$$

где  $i_{in}$  - входной ток,  $v_{out}$  - выходное напряжение,  $g$  - проводимость мемристора

Подставляя (1) в (2) и используя линейно-дрейфовую модель мемристора [3], получаем следующую систему уравнений, описывающих МС-ТШ (без входного тока)

$$C \frac{dv}{dt} = -(g + G) \cdot v \mp (GV_S + I_S) \quad (3)$$

$$\frac{dg}{dt} = -k \cdot v, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент инерционности мемристора.

Система (3)-(4) равносильна одному нелинейному уравнению второго порядка – уравнению Рикатти со знакопеременным свободным членом:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dg}{dt} + \frac{1}{2C} g^2 + \frac{G}{C} g \right) \mp \frac{k}{C} (GV_S + I_S) = 0 \quad (5)$$

Разные знаки свободного члена усложняют решение уравнения (5), аналитическое решение уравнения отсутствует.

Рассмотрим поведение МС-ТШ на фазовой плоскости переменных  $g$  и  $v$ . Поскольку они ограничены, то фазовый портрет системы (3) и (4) лежит в прямоугольнике, показанном на рис.3. Пусть  $G_S > g_{max}$ , т.е. выполняются условия генерации, и ограничимся случаем малых значений  $kC/G$ . В таком случае фазовая траектория, например, обозначенная цифрой (2) сжата по оси  $g$ . Она последовательно проходит ранее введенные на петле гистерезиса (рис.2) точки  $S, w, s, u$ .

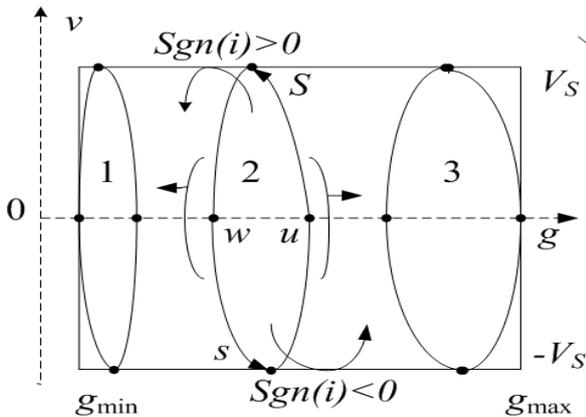


Рис. 3. Фазовый портрет МС-ТШ

Замыкание фазовой траектории соответствует предельному циклу, который в данном случае обязательно существует, так как задан режим генерации. Если фазовая траектория не замыкается, то она за период колебаний смещается по оси  $g$ .

Можно показать, что у фазовых траекторий МС-ТШ существуют предельные циклы, в которых  $g$  принимает значения, близкие к граничным. Переключение между этими предельными циклами может осуществляться входными сигналами. Втекающий входной ток усиливает возбуждение (уменьшает  $g$ ), а вытекающий ток затормаживает генерацию.

При малом изменении  $g$  за период колебаний для его полупериода справедлива оценка

$$T = \frac{C}{g + G} \ln \frac{v(0)(g + G) \pm (GV_S + I_S)}{v(T)(g + G) \pm (GV_S + I_S)} \quad (6)$$

где  $v(0)$  и  $v(T)$  значения узлового напряжения в начале и конце полупериода, соответственно. Из (6) следуют оценки периода колебаний для максимально возбужденного режима и заторможенного режима.

При  $G = G_S$  для максимально возбужденного режима ( $g = 0$ ) период ( $2T$ ) составляет  $2 \cdot C/G_S$ , а для максимально заторможенного режима ( $g = 0.9 \cdot G_S$ ) период возрастает до  $3.86 \cdot C/G_S$ .

#### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МС-ТШ

Целью проведённого моделирования являлось подтверждение мультистабильного характера поведения МС-ТШ. Моделирование МС-ТШ проводилось в системе MATLAB+SIMULINK.

При моделировании использовались типичные значения параметров мемристоров [3] и соответствующие им следующие значения параметров МС-ТШ:  $V_S = 1$  В,  $I_S = 1$  мкА,  $G_S = I_S/V_S = 1$  мкСм,  $G = 1$  мкСм,  $k = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{АВ}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Диапазон проводимости мемристоров определялся условиями задачи. Например, при исследовании генерации значение  $g_{min}$  выбиралось равным  $0.1 G_S$ , а  $g_{max}$  варьировалось от  $0.4 G_S$  до  $0.9 G_S$ .

Величина конденсатора выбрана равной  $C = 1$  пФ, что обеспечивает значение  $kC/G = 0.2$ , при котором обеспечивается достаточно большое изменение проводимости мемристора за период колебаний.

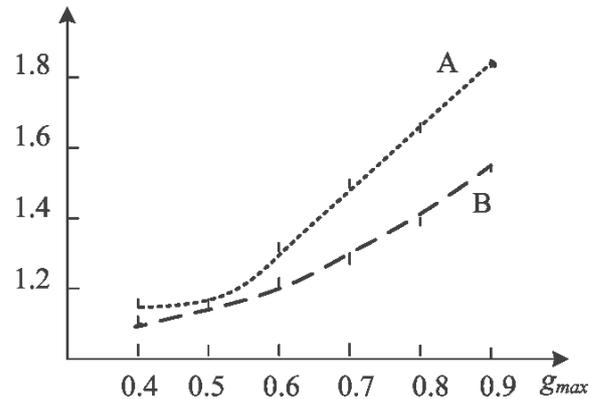


Рис. 4. Отношение периодов (А) и амплитуд (В) двух режимов генерации при  $g_{min} = 0$

Моделирование подтвердило наличие двух устойчивых режимов МС-ТШ генератора. Частоты генерации лежат в диапазоне сотен кГц. Отношение периода заторможенной генерации к периоду возбужденной (кривая А на рис.4) растет с увеличением  $g_{max}$  и соответствует ранее полученной оценке. Также растет и отношение амплитуды изменения проводимости при заторможенной генерации к амплитуде изменения проводимости при возбужденной генерации (кривая В на рис. 4).

Из этих результатов следует возможность использовать МС-ТШ в качестве управляемого двустабильного генератора с памятью. Информация в этом случае задается частотой, величиной проводимости мемристора, а также скважностью импульсов выходного напряжения. Управление состоянием МС-ТШ осуществляется входными сигналами.

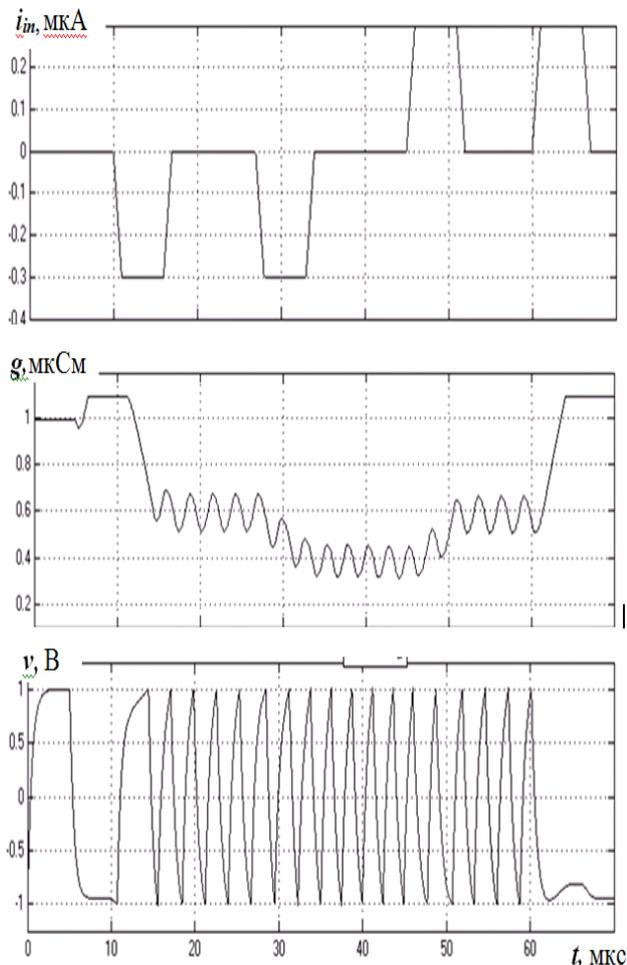


Рис. 5. Разнополярное управление моностабильного МС-ТШ: внешние сигналы (а), проводимость мемристора (б), напряжение на конденсаторе (в)

При моделировании моностабильного режима использовался другой диапазон  $0.1 \text{ мкСм} = g_{\min} < g < g_{\max} = 1.1 \text{ мкСм}$ , величина  $G = 1 \text{ мкСм}$ . Моделирование показало возможность управления переходом из возбужденного состояния (генерации) к заторможенному устойчивому состоянию разнополярными и однополярными импульсами. Результаты моделирования приведены на рис. 5 и 6.

Как следует из рис. 5, МС-ТШ возбуждается первым отрицательным импульсом, второй импульс усиливает возбуждение (проводимость падает, а частота растет). Первый положительный импульс приводит к частичному торможению, а второй положительный импульс полностью тормозит

генерацию, и схема возвращается в устойчивое состояние.

При монополярном управлении (рис. 6) первый отрицательный импульс возбуждает систему, второй также отрицательный импульс с большей амплитудой, вызывает торможение с небольшим возбуждающим выбросом, третий положительный импульс большой амплитуды приводит к возбуждению, четвертый положительный импульс малой амплитуды ведет к безусловному торможению.

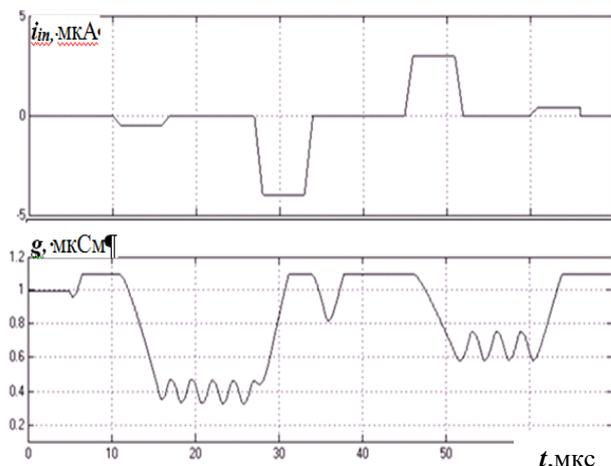


Рис. 6. Монополярное управление моностабильного МС-ТШ: внешние сигналы (а), проводимость мемристора (б)

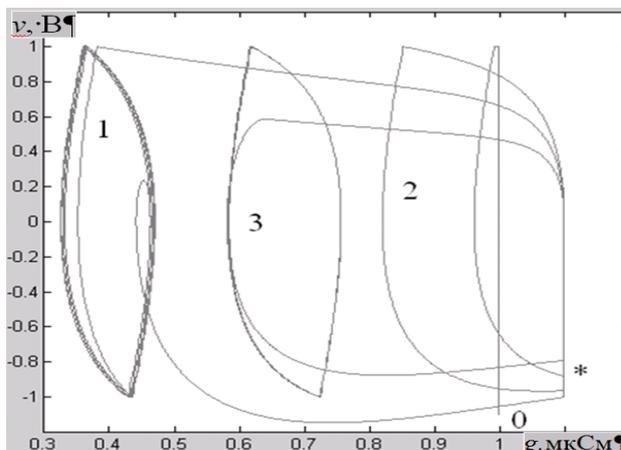


Рис. 7. Фазовый портрет МС-ТШ с монополярным управлением; 0 - исходное состояние, 1 - первый цикл после отрицательного возбуждения, 2 - затухающий цикл после отрицательного торможения, 3 - цикл после положительного возбуждения, \* - устойчивая точка после отрицательного торможения

Эти процессы показаны на фазовой диаграмме (рис. 7). Последовательность циклов колебаний после первого отрицательного импульса (кривая 1) стремится к возбужденной генерации, после второго импульса (кривая 2) фазовая траектория уходит к заторможенному состоянию, после третьего импульса (кривая 3) имеет место процесс генерации со слабым сдвигом в направлении торможения, после четвертого

импульса изображающая точка быстро возвращается в устойчивое состояние.

Таким образом, моделирование подтвердило прогнозируемое поведение МС-ТШ одновибратора.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что обсуждаемая схема генератора на триггере Шмитта с мемристором и конденсатором на входе может иметь несколько устойчивых состояний динамического равновесия, включая как статические стабильные состояния, так и установившиеся периодические режимы, различающиеся частотой генерируемых импульсов.

Выполненный в работе анализ справедлив и для сочетания мемристора с другими активными приборами, которые, как и триггер Шмитта, обладают неоднозначной (гистерезисной) характеристикой. Таким может быть прибор с отрицательным дифференциальным сопротивлением с  $S$ -образной вольтамперной характеристикой типа тиристора,  $s$ -диода и др.

Предложенная схема МС-ТШ может быть использована для построения нейроморфных систем, на искусственных нейронах с синаптической пластичностью, реализуемых на основе стандартных интегральных элементов в сочетании с мемристорами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 15-07-05539\_а.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chua L. O. Memristor—Missing Circuit Element // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. V. 18. №9. P. 507–519.
- [2] Chua L.O., Kang S.M. Memristive Devices and Systems // Proc. IEEE. 1976. V. 64. №2. P. 209–223.
- [3] Strukov D.B., Snider G.S., Stewart, D.R. The Missing Memristor Found // Nature. 2008. V. 453. P. 80–83.
- [4] Itoh M., Chua L. O. Memristor Oscillators // Int. J. Bifurcation Chaos. 2008. V.18. № 11. P. 3183–3206.
- [5] Zidan M., Omran H, Smith Casey, Radwan A.G, Salama K.N. A Family of Memristor Based Reactance Less Oscillators // Int. J. Circuit Theory and Applications. 2014. V 42.№11. P. 1103–1122.
- [6] Talukdar A., Radwan A.G., Salama K.N. Generalized Model for Memristor Based Wien Family Oscillators // Microelectronics Journal, 2011. V. 42. № 9.P. 1032–1038.
- [7] Talukdar A., Radwan A.G., Salama K.N. Non Linear Dynamics of Memristor Based 3 Order Oscillatory System // Microelectronics journal. 2012. V 43.№3.P. 169–175.
- [8] Bahgat A., Salama K.N. Memristor-based mono-stable oscillator // Arxiv preprint. 2012. ArXiv. 1207.0847.
- [9] Muthuswamy B., Chua L.O. Simplest Chaotic Circuit // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2010, V. 20, № 5, P. 1567–1580.
- [10] Driscoll T, Pershin Y., Basov D., Di Ventra M. Chaotic Memristor // ApplPhys A. 2011. V. 102. P. 885–889
- [11] Buscarino A. A Gallery of Chaotic Oscillators Based on HPMemristor // Int. J. Bifurcation Chaos. 2013. V.23. №5. 1330015
- [12] Ракитин В.В., Русаков С.Г. Генераторные схемы на мемристорных элементах // Информационные технологии. 2015. №10. С.772—781.
- [13] Pabst O, Schmidt T. Frequency Dependent Rectifier Memristor Bridge Used as a Programmable Synaptic Membrane Voltage Generator //J ElectrBioimp. 2013. V. 4. P. 23–32.
- [14] Галушкин А.И. Мемристоры в развитии высокопроизводительной вычислительной техники //Информационные технологии. Том 21. 2015. №2. С 146—156.
- [15] Serrano-Gotarredona T., Masquelier T., Prodromakis T et al. STD Pand STDP Variations With Memristorsfor Spiking Neuromorphic Learning Systems // Frontiers in Neuroscience. 2013. V.7. P. 1–15.
- [16] Corinto F., Ascoli A., Gilli M. Analysis of Current-Voltage Characteristics for Memristive Elements in Pattern Recognition Systems // I. Journal of Circuit Theory and Applications. 2012. V.40. №12.P.1277-1320
- [17] Pershin V., and Di Ventra, M. Practical approach to programmable analog circuits with memristors// IEEE Trans. on Circuits and Syst..I. 2010. V.57. № 8. P. 1857–1864.

## Memristor-based Schmitt trigger oscillator with multiple steady states of dynamic equilibrium

V.V. Rakitin<sup>1,2</sup>, S.G. Rusakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, [ippm@ippm.ru](mailto:ippm@ippm.ru)

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise "Research Institute of Physical Problems."

**Keywords** — memristor, theory of memristor systems, memristor oscillators, Schmitt trigger.

#### ABSTRACT

The principle of operation of the Schmitt trigger oscillator with a memristor and capacitor at the input (MC-TS) is discussed. The mathematical model of such an

oscillator is presented. It was shown that the discussed circuit MC-TS could have the multiple steady states of dynamic equilibrium including both dc points and periodic regimes with different frequencies of the generated pulses. The results of MC-TS oscillator simulation and MC-TS single-shot multivibrator simulation are presented.

## REFERENCES

- [1] Chua L. O. Memristor—Missing Circuit Element // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. V. 18. №9. P. 507–519.
- [2] Chua L.O., Kang S.M. Memristive Devices and Systems // Proc. IEEE. 1976. V. 64. №2. P. 209–223.
- [3] Strukov D.B., Snider G.S., Stewart, D.R. The Missing Memristor Found // Nature. 2008. V. 453. P. 80–83.
- [4] Itoh M., Chua L. O. Memristor Oscillators // Int. J. Bifurcation Chaos. 2008. V.18. № 11. P. 3183–3206.
- [5] Zidan M., Omran H, Smith Casey, Radwan A.G, Salama K.N. A Family of MemristorBased ReactanceLess Oscillators // Int. J. Circuit Theory and Applications. 2014. V 42.№11. P. 1103–1122.
- [6] Talukdar A., Radwan A.G., Salama K.N. Generalized Model for Memristor Based Wien Family Oscillators // Microelectronics Journal, 2011. V. 42. № 9.P. 1032–1038.
- [7] Talukdar A., Radwan A.G., Salama K.N. Non Linear Dynamics of Memristor Based 3 Order Oscillatory System // Microelectronics journal. 2012. V 43.№3.P. 169–175.
- [8] Bahgat A., Salama K.N. Memristor-based mono-stable oscillator // Arxiv preprint. 2012. ArXiv. 1207.0847.
- [9] Muthuswamy B., Chua L.O. Simplest Chaotic Circuit // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2010, V. 20, № 5, P. 1567–1580.
- [10] Driscoll T, Pershin Y., Basov D., Di Ventra M. Chaotic Memristor // ApplPhys A. 2011. V. 102. P. 885–889
- [11] Buscarino A. A Gallery of Chaotic Oscillators Based on HPMemristor // Int. J. Bifurcation Chaos. 2013. V.23. №5. 1330015
- [12] Rakitin V. V., Rusakov S. G. Memristor-Based Oscillator Circuits // Information Technologies. 2015. №10. P.772—781. /in Russian/.
- [13] Pabst O, Schmidt T. Frequency Dependent Rectifier Memristor Bridge Used as a Programmable Synaptic Membrane Voltage Generator //J ElectrBioimp. 2013. V. 4. P. 23–32.
- [14] Galushkin A. I. Memristor in High-Performance Computing Development // Information Technologies. V 21. 2015. №2. P 146—156. /in Russian/.
- [15] Serrano-Gotarredona T., Masquelier T., Prodromakis T et al. STD Pand STDP Variations With Memristorsfor Spiking Neuromorphic Learning Systems // Frontiers in Neuroscience. 2013.V.7. P. 1–15.
- [16] Corinto F., Ascoli A., Gilli M. Analysis of Current-Voltage Characteristics for Memristive Elements in Pattern Recognition Systems // I. Journal of Circuit Theory and Applications. 2012. V.40. №12.P.1277-1320
- [17] Pershin V., and Di Ventra, M. Practical approach to programmable analog circuits with memristors// IEEE Trans. on Circuits and Syst.I. 2010. V.57. №8. P. 1857–1864.