

Симметризованный мемристорный релаксационный генератор

В.В. Ракитин

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва

vlarak@rambler.ru

Аннотация — Рассмотрен принцип действия симметризованного мемристорного релаксационного генератора на триггере Шмитта с конденсатором (СМГ). Выполнен анализ режимов его работы и способы управления ими. Приведена математическая модель СМГ. Приведены результаты моделирования СМГ, подтверждающие выводы анализа.

Ключевые слова — мемристор, мемристорные генераторы, симметризованный мемристорный генератор, триггер Шмитта.

I. ВВЕДЕНИЕ

Применение аналоговых резистивных элементов с памятью – мемристоров открывает широкие возможности интегральной реализации перспективных устройств и систем [1, 2]. К их числу относятся различные типы генераторов, которые являются типовым элементом в нейроморфных системах. Описаны различные типы мемристорных генераторов, в которых используются нелинейные и инерционные свойства мемристоров [3-7]. Особый интерес представляют управляемые релаксационные генераторы, где мемристор заменяет традиционные реактивные элементы и позволяет уменьшить размеры самих генераторов [4,5,8].

Мемристор является несимметричным прибором и в ряде случаев для симметризации используют встречно-параллельное или встречно-последовательное включение мемристоров [5, 6, 8, 9]. Симметризация улучшает параметры генераторов, снижает требования к точности параметров мемристоров.

Предлагается симметризовать мемристорный генератор на триггере Шмитта с конденсатором [10], что расширяет его функциональные возможности и открывает новые способы управления поведением. Появляется возможность ввести эффективное управление генератором за счет нарушения его симметрии, что облегчает перестройку режимов генерации. Это позволяет использовать его в различных устройствах обработки информации, в т.ч. в нейроморфных системах.

Статья организована следующим образом. В разделе II описан принцип действия симметризованного мемристорного генератора. В разделе III приведена математическая модель такого генератора. В разделе IV

приведены некоторые результаты моделирования обсуждаемого генератора.

II. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИММЕТРИЗОВАННОГО МЕМРИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА (СМГ)

Симметризованный мемристорный генератор (СМГ), рис.1, построен на основе триггера Шмитта (ТШ), охваченного отрицательной токовой обратной связью, с конденсатором C и двумя идентичными встречно-параллельными мемристорами на входе.

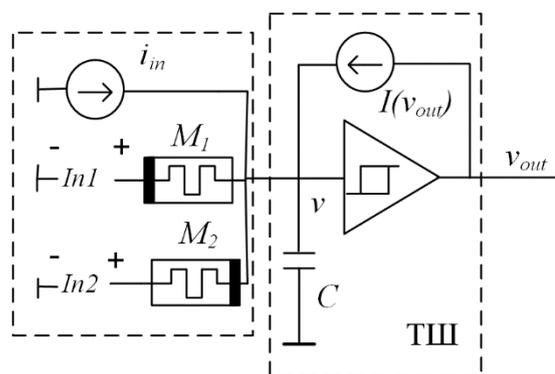


Рис. 1. Блок схема СМГ

Первый мемристор M_1 подключен к конденсатору анодом (его проводимость растет при положительном потенциале на конденсаторе). Вторым мемристором M_2 подключен к конденсатору катодом. СМГ имеет токовый вход, подсоединенный к конденсатору, и два потенциальных входа ($In1$, и $In2$), связанных с конденсатором через мемристоры. ТШ выбран в качестве интегральной КМОП реализации активного элемента с S-образной ВАХ, который в сочетании с конденсатором является простейшим релаксационным генератором. Идентичность мемристоров с проводимостью управляемой напряжением обеспечивает сохранение их суммарной проводимости при антипараллельном включении. При использовании мемристоров с сопротивлением, управляемым током, для сохранения их суммарного сопротивления они должны быть подключены ко входу ТШ встречно-последовательно. Сохранение (или небольшие изменения) суммарной проводимости (сопротивления) мемристоров в некотором диапазоне значений кардинально изменяет работу мемристорного

генератора и расширяет его функциональные возможности.

Входная ВАХ ТШ представляет гистерезисную функцию, которую будем считать симметричной по отношению к началу координат плоскости напряжение – ток, плоскости $v - i$, рис.2.

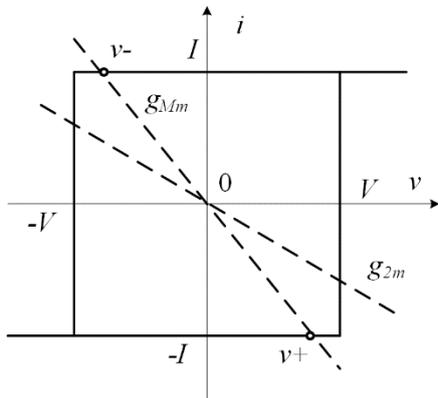


Рис. 2. Входная характеристика ТШ в составе СМГ

Нижняя ветвь ВАХ соответствует положительному выходному напряжению, состоянию «1» схемы, а верхняя ветвь – отрицательному. Симметричная ВАХ описываемого ТШ характеризуется двумя параметрами: пороговым напряжением V и значением входного тока I (положительным при втекании во входной узел). Их отношение задает характерную проводимость $G = V/I$. При подключении ко входному узлу ТШ конденсатора C схема становится релаксационным генератором – мультивибратором. Период колебаний такого генератора составляет $T = 2(2CV/I) = 4C/G$.

Далее в генераторе будем использовать мемристор с проводимостью g , управляемой напряжением и ограниченную диапазоном $g_m < g < g_M$. Его поведение описывается формулами

$$i = gv, \quad (1)$$

$$\frac{dg}{dt} = kv \quad (2)$$

где k определяет скорость изменения проводимости.

Подключение параллельно конденсатору мемристора ($g_m < g < g_M$) порождает три варианта схем:

- 1) Симметричный триггер при $g_m > G$.
- 2) Симметричный мультивибратор при $g_M < G$, его период колебаний $T = 2(C/g)\ln(G + g/G - g)$.
- 3) Несимметричный заторможенный мультивибратор – одновибратор при $g_m < G < g_M$.

Поведение третьего варианта схемы значительно изменяется при $k \lesssim G/C$ [10]. В зависимости от начальных условий она может быть генератором пачки импульсов или мультивибратором.

В первом случае схема после возбуждения возвращается в устойчивое состояние с $g = g_M$. Во

втором после возбуждения она переходит в режим незатухающих релаксационных колебаний, при котором g колеблется вблизи g_m . Внешним тормозящим сигналом режим генерации может быть остановлен и схема переходит в устойчивое состояние. В таком случае третья схема становится управляемым генератором с жестким возбуждением (и торможением). В отличие от двух первых схем она несимметрична в силу однополярности выходного сигнала в устойчивом состоянии. Усложняя схему можно добиться биполярности выходного сигнала в статическом состоянии, т.е. устранить несимметрию. Тогда у схемы имеется два режима: возбужденный (генерация) и заторможенный с двумя уровнями выходного сигнала, которые, в частности, могут быть разнополярными. Подобная симметрия в сочетании с режимом генерации расширяют способы взаимодействия СМГ с обычными двоичными схемами. Другим важным свойством рассматриваемого СМГ является управляемое торможение, т.е. возможность изменения количества колебаний при переходе от генерации к любому из устойчивых состояний, что открывает новые возможности построения осцилляторных и нейроморфных систем.

Симметризируем схему подключением второго мемристора M_2 идентичного первому M_1 , параллельно ему, но с противоположной полярностью, рис.1. Если их проводимость $g_{Mm} = g_M + g_m > G$, то схема обладает двумя устойчивыми состояниями: v^+ и v^- . Отметим, что в состоянии v^+ $g_1 = g_M$ и $g_2 = g_m$. При подаче импульсов входного тока i_{in} , достаточных для изменения напряжения на конденсаторе до порогового напряжения, эти состояния можно изменять. Если сумма минимальных проводимостей мемристоров $g_{2m} = g_m + g_m < G$, то выполняются условия существования релаксационных колебаний схемы – возбуждения схемы. Пара в режиме генерации ведет себя как один мемристор. В силу идентичности мемристоров сумма их проводимостей сохраняется постоянной, пока они не достигают границ диапазона.

Для управления режимом генерации можно использовать импульсы входного напряжения V_{in1}, V_{in2} , которые нарушают симметрию схемы и позволяют изменять суммарную проводимость. На любой из входов можно подать импульс, вызывающий переход из любого устойчивого состояния в режим генерации – возбудить схему. Другим импульсом можно ликвидировать возбуждение и перевести схему в заданное устойчивое состояние – затормозить схему. Это продемонстрировано на рис. 3, где на фазовой плоскости $g_1 - v$ показана траектория движения изображающей точки при возбуждении схемы из состояния v^+ (с $g_{Mm} > g_s = g_1 + g_2 > g_{2m}$) и далее при торможении в состояние v^- .

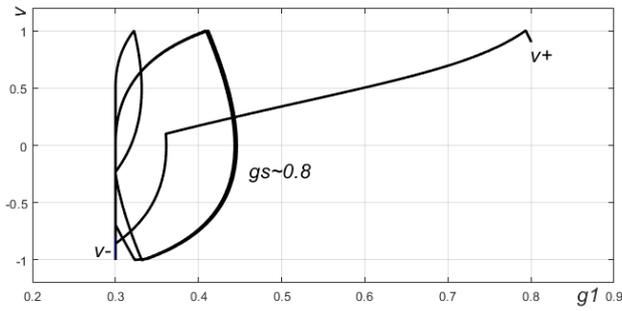


Рис. 3. Фазовая диаграмма СМГ при возбуждении с последующим торможением

Рассмотрим подобные операции более подробно. Пусть схема первоначально была в состоянии v^+ , и выходное напряжение было положительным. Тогда подача $V_{in1} < 0$ не уменьшает g_s и состояние ТШ. Но приход положительного перепада превышающего порог $V_{th1} = (V - v^+)(1 + g_m/g_M)$ переключает ТШ, и выходное напряжение становится отрицательным, т.е. происходит переход с состояние v^- . При подаче положительного импульса с амплитудой и длительностью в определенном диапазоне при переключении ТШ может создаться ситуация когда $g_s < G$ и схема может возбудиться.

При подаче $V_{in2} > 0$, превышающего порог $V_{th2} = (V - v^+)(1 + g_m/g_M)$, схема также переключается в состояние v^- . В случае $V_{in2} < 0$ напряжение на конденсаторе снижается. При $V_{in2} < V_{in2}^- = -v^+(g_m + g_M)/g_m$ оно может стать отрицательным и начнется уменьшение g_1 , что может привести к возбуждению.

Аналогичные рассуждения справедливы и для начального состояния v^- .

Торможение схемы при подаче управляющих напряжений происходит за счет увеличения суммарной проводимости, вызывающей переход в одно из стабильных состояний. При отрицательных входных напряжениях происходит возрастание разности $g_1 - g_2$ и схема переходит в состояние v^+ , а при положительных - разность уменьшается и схема переходит в состояние v^- . Время перехода из возбуждения в заторможенный режим, а значит и количество колебаний напряжения на конденсаторе и на выходе схемы, зависит от амплитуды и места подачи импульсов управляющего напряжения.

Торможение схемы в одно из устойчивых состояний может быть произведено и при подаче входного тока. Однако в этом случае имеет значение время его прихода по отношению к колебаниям напряжения на конденсаторе. Если входной ток поступает на конденсатор в интервал времени перед достижением порога переключения ТШ и задерживает переключение, то генерация может прекратиться.

Из вышеизложенного следует, что поведение схемы, определяемое процессами перезарядки конденсатора, изменениями проводимости двух

мемристоров и внешними воздействиями, носит достаточно сложный характер.

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СМГ

Поведение схемы, рис.1, описывается следующей системой дифференциальных уравнений

$$C \frac{dv}{dt} = -g_1(v - V_{in1}) - g_2 \cdot (v - V_{in2}) + i_{in} + I(v_{out}), \quad (3)$$

$$\frac{dg_1}{dt} = k_1 \cdot (v - V_{in1}), \quad (4)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = -k_2 \cdot (v - V_{in2}) \quad (5)$$

Пока проводимости мемристоров не достигают границ диапазонов и входные напряжения отсутствуют, система (3–5) вырождается

$$C \frac{dv}{dt} = -g_1 v - g_2 v + i_{in} + I(v_{out}) = -g_s v + i_{in} + I(v_{out}), \quad (6)$$

$$\frac{dg_s}{dt} = (k_1 - k_2) \cdot v. \quad (7)$$

При идентичности мемристоров $k_1 = k_2$ и g_s постоянно и уравнение (6) эквивалентно уравнению генератора на ТШ, содержащего конденсатор C и резистор с проводимостью g_s на входе. При $g_s < G$ период колебаний

$$T = (C/g_s) \ln(G + g_s/G - g_s)$$

Если $k_1 \neq k_2$, то система (6)–(7) преобразуется в уравнение Рикатти со знакопеременным свободным членом

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dg_s}{dt} + \frac{1}{2C} g_s^2 \right) \mp \frac{k}{C} I = 0. \quad (8)$$

Получение точного решения такого уравнения путем сшивания решений, соответствующих разным знакам свободного члена, достаточно проблематично и для исследования ее поведения целесообразно использовать численное моделирование.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СМГ

Моделирование уравнений ММГ (3)–(5) проводилось в системе MATLAB + SIMULINK. При моделировании использовались следующие значения коэффициентов системы: $V = 1 \text{ В}$, $I = 1 \text{ мкА}$, $G = V/I = 1 \text{ мкСм}$, $C = 1 \text{ пФ}$, $k = 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ АВ}^{-2} \text{ с}^{-1}$, $g_m = 0.3G \text{ мкСм} = 0.8 \text{ мкСм}$. Отсюда следует $g_{Mm} = 1.1G$, $g_{2m} = 0.6G$, $v^+ \approx 0.9 \text{ В}$, $v^- \approx -0.9 \text{ В}$. $V_{th1} = 0.137 \text{ В}$, $V_{th2} = 0.37 \text{ В}$. Период колебаний при малом g_s порядка 4 мкс.

Моделирование подтвердило вышеуказанные особенности СМГ.

СМГ может находиться в двух устойчивых (заторможенных) состояниях и в режиме генерации – возбужденном состоянии, внешние сигналы позволяют производить переход между состояниями. Для перехода из состояния v^+ в состояние v^- импульсы напряжения должны превышать V_{th1} на первом входе и V_{th2} на втором входе. Для возбуждения СМГ требуются короткие импульсы с амплитудой порядка 1 В. Торможение СМГ производится импульсами напряжения обоих полярностей.

Типичный пример переходных процессов СМГ приведен на рис. 4. Первоначально СМГ в состоянии v^+ , в момент $t = 7$ мкс приходит импульс $V_{in1} = 1$ В длительностью 3 мкс, схема переходит в режим генерации и g_s снижается с 1.1 мкСм до 0.85 мкСм. Подача $V_{in1} = -0.05$ В в момент времени $t = 15$ мкс приводит к постепенному возвращению в первоначальное состояние с генерацией 2 импульсов.

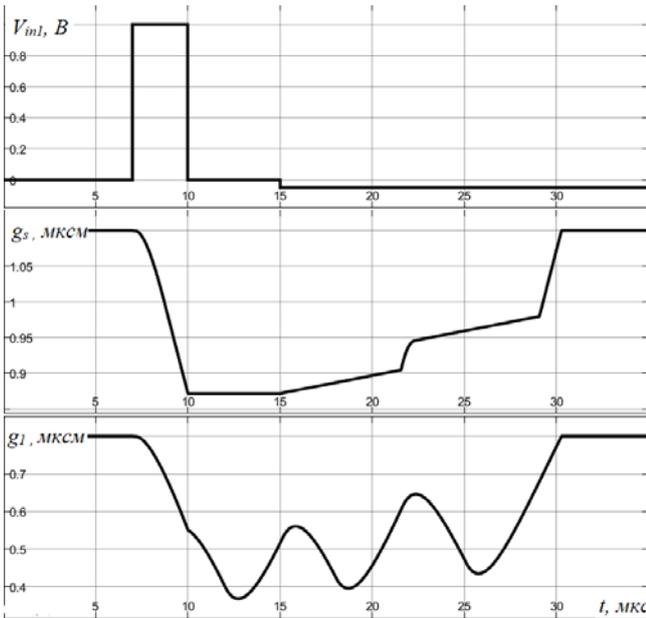


Рис. 4. Переходные процессы СМГ – изменение суммарной проводимости и проводимости первого мемристора при подаче положительного импульса возбуждения и отрицательного импульса торможения на его катод

Для возбуждения СМГ требуется, чтобы амплитуда и длительность импульсов лежали в определенном диапазоне. При подаче на вход $In1$ СМГ, находящегося в состоянии v^+ , положительного импульса в зависимости от его амплитуды возможны следующие ситуации: состояние не изменяется, переход в состояние v^- , кратковременное снижение g_s и возвращение в состояние v^+ , возбуждение. Для перехода в возбужденное состояние при заданной амплитуде длительность импульса должна лежать в определенном диапазоне, рис. 5.

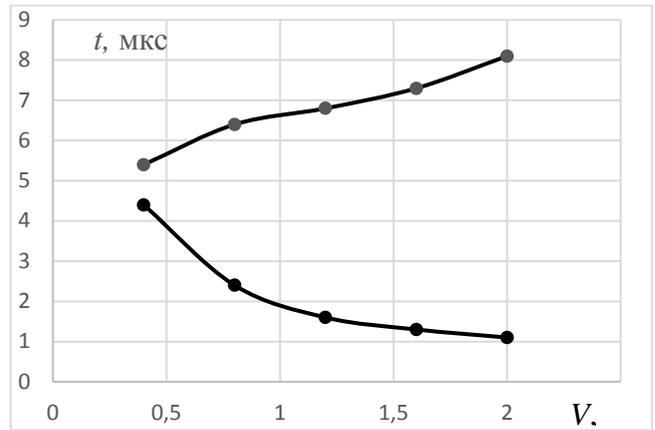


Рис. 5. Зависимость минимальной и максимальной длительности импульса возбуждения от амплитуды

Длительность процесса торможения (и количество колебаний напряжения на конденсаторе и на выходе) зависит от амплитуды, полярности импульса и места приложения импульса торможения, рис. 6 (для сравнения рис. 7).

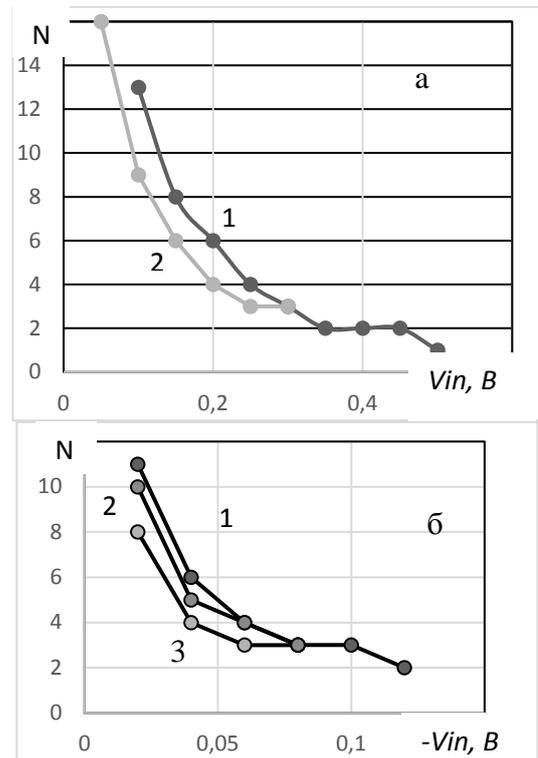


Рис. 6. Зависимость количества импульсов от амплитуды положительного (а) и отрицательного (б) сигнала торможения на первом входе

В рассматриваемом случае длина выходной пачки импульсов может достигать одного – двух десятков импульсов. При уменьшении величины конденсатора (снижения периода колебаний) количество импульсов в пачке увеличивается до нескольких десятков.

Разбаланс параметров мемристоров существенно влияет на поведение СМГ, в частности на процесс торможения. Это продемонстрировано на рис. 6.

Кривые под номером 1 соответствуют одинаковым мемристам. Кривые под номером 2 соответствуют менее инерционному M_2 ($k_2=1.2$), а кривая 3 менее инерционному M_1 (на рис. 6а кривые 1 и 3 совпадают).

Напряжение на конденсаторе после торможения проинвертировано по отношению к полярности импульса торможения, а выходной сигнал имеет ту же полярность, рис. 7. Положение импульсов торможения слабо влияет на переходные процессы. В данном случае

положительный тормозящий сигнал V_{in2} , поданный одновременно с импульсом возбуждения на первом входе V_{in1} , переводит схему в состояние v^- , а отрицательный - в состоянии v^+ . Причем чувствительность схемы к положительному торможению выше. При подаче тормозящих сигналов на первый вход выше чувствительность к отрицательному торможению.

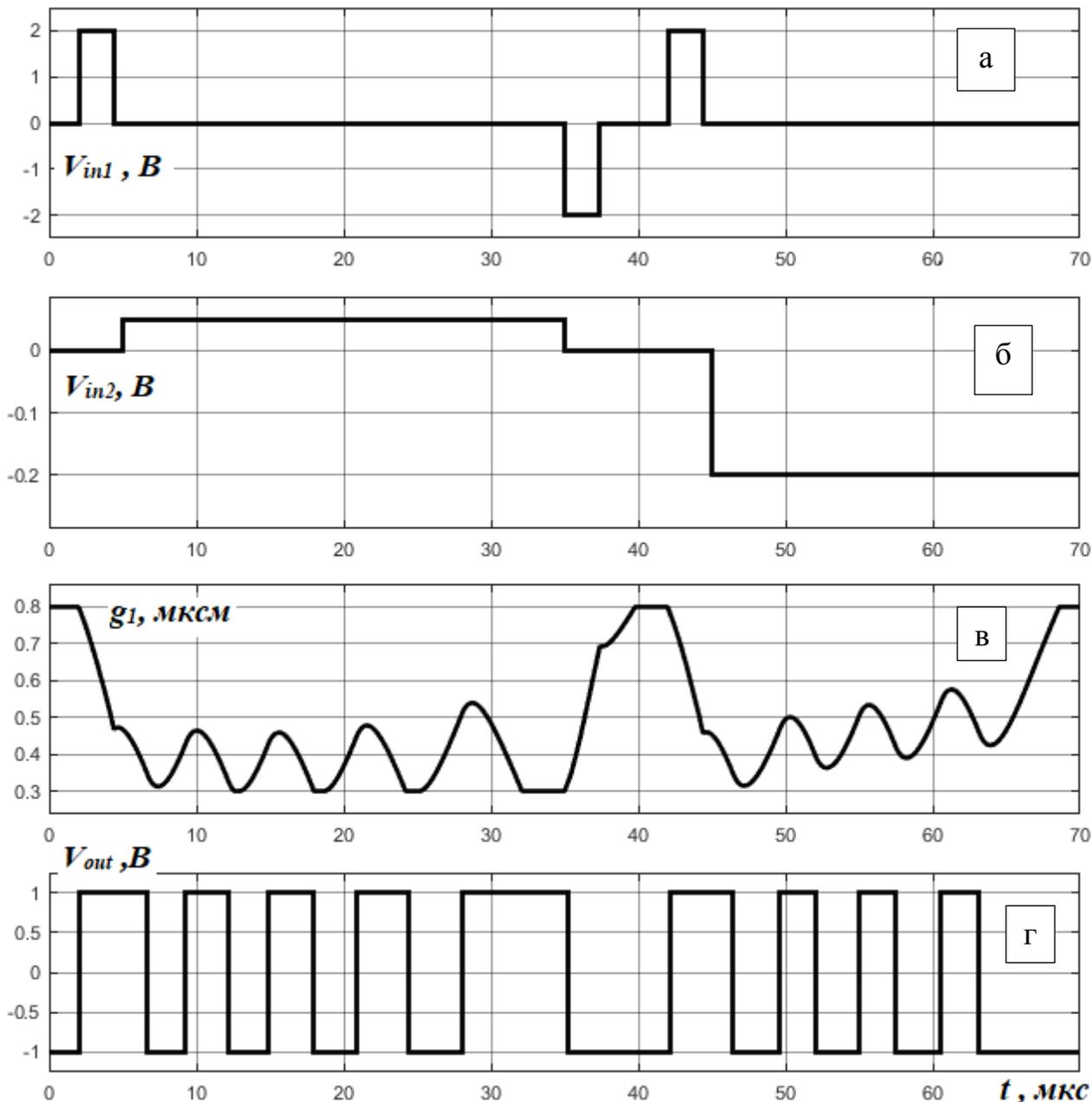


Рис. 7. Управление СМГ: а - входные сигналы возбуждения (положительные) и переключения (отрицательные) на первом входе, б - входные тормозящие сигналы на втором входе, в - изменения проводимости мемристора g_1 , г - выходные сигналы

Моделирование показало, что перечисленные свойства СМГ (переключение между устойчивыми состояниями, управление возбуждением и торможением) сохраняются и для входных сигналов

более сложной формы, в частности торможением можно эффективно управлять последовательностью импульсов. Это вполне объяснимо поскольку входные сигналы интегрируются конденсатором на входе ТШ.

Количественные характеристики в таких процессах будут сильно зависеть от реальных параметров мемристоров.

Анализ результатов моделирования позволяет сформулировать следующие утверждения:

- СМГ имеет два устойчивых (заторможенных) состояния, переключение между которыми может осуществляться сигналами по токовому входу и по потенциальному входу.
- СМГ может быть в заторможенном и возбужденном состоянии, переключение между которыми осуществляется по любому из потенциальных входов.
- Длительность перехода из возбужденного состояния в заторможенное зависит от амплитуды импульса торможения, а конечное состояние - от полярности торможения.
- Уровни выходных сигналов СМГ пригодны для управления входами СМГ. Однако в ряде случаев целесообразно использовать схемы сдвига уровней (для замены разнополярных сигналов на однополярные).

Перечисленные особенности СМГ сохраняются при небольшом (порядка десятка процентов) разбалансе параметров мемристоров.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что симметризованный мемристорный генератор обладает широкими функциональными возможностями. Он может находиться в одном из двух устойчивых состояний и в возбужденном состоянии. Возбуждение и торможение СМГ осуществляется импульсами управления на его потенциальных входах. Переход из возбужденного в заторможенное состояние зависит от интенсивности торможения и происходит за несколько периодов колебаний.

Частотный диапазон работы СМГ определяется инерционностью мемристоров, причем отношение скорости изменения проводимости к скорости зарядки конденсатора определяет длину пачки выходных двоичных импульсов, которая составляет десятки

импульсов. Это открывает возможности применять его в качестве аналогово-дискретного преобразователя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-07-00498.

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] Itoh M., Chua L O. Memristor Oscillators // *Int. J. Bifurcation Chaos*. 2008. V.18. № 11. P. 3183–3206.
- [4] Zidan M.A., Omran H, Smith C., 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.
- [5] Radwan A.G., Fouda M.E. On the Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor, *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 26. Springer International Publishing (2015)
- [6] Buscarino A., Fortuna L., Frasca M., Gambuzza L. A gallery of chaotic oscillators based on HP memristor // *International Journal of Bifurcation and Chaos* 23(5), 1330,015 (2013)
- [7] 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.
- [8] Fouda M.E., Khatib M.A., Mosad A.G., Radwan A.G. Generalized analysis of symmetric and asymmetric memristive two-gate relaxation oscillators // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, vol. 60, no. 10, p. 2701–2708
- [9] Vourkas I., Georgios Ch. Sirakoulis G.C. Memristor-Based Nanoelectronic Computing Circuits and Architectures, *Emergence, Complexity and Computation*, vol. 19, Springer International Publishing (2016)
- [10] Rakitin V.V., Rusakov S.G. Memristor oscillator Schmitt trigger with multiple steady states of dynamic equilibrium // *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2016. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2016. Part I. P. 79-85.*

The Symmetrized Memristor Relaxation Oscillator

V.V. Rakitin

Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS, Moscow

vlarak@rambler.ru

Abstract — The use of analog resistive elements with memory - memristors opens wide opportunities for the integrated implementation of promising devices and systems [1, 2]. These include various types of oscillators, which are a typical element in neuromorphic systems. Various types of memristor oscillators are described, in which non-linear and inertial properties of memristors are used [3-7]. Of particular interest are controlled relaxation oscillators, where the memristor replaces the traditional reactive elements and makes it possible to reduce the dimensions of the oscillators themselves [4, 5, 8]. A memristor is an asymmetric device and in some cases for symmetrization use counter-parallel or the back-sequential inclusion of memristors [5,6,8,9]. Symmetrization improves the parameters of the oscillators, reduces the requirements for the accuracy of the memristor parameters.

It is proposed to symmetrize a memristor oscillator on a Schmitt trigger with a capacitor [10]. The principle of the action of the symmetrized memristor relaxation oscillator (SMO) is considered. It is built on the basis of the Schmitt trigger (TS), covered by negative current feedback, with a capacitor and two identical counter-parallel memristors at the input. The identity of memristors ensures the preservation of their total conductivity, which drastically changes the work of SMO and expands its functional capabilities. SMO has two modes: excited (generation) and inhibited with two levels of the output signal. The transition between modes occurs when input signals are applied to the potential and current inputs of the SMG. The analysis and simulation of the SMO operation in a wide range of input signals is performed. It is established that the duration of the transition from the excited state to the inhibited state depends on the amplitude of the braking pulse, and the final state from the polarity of the inhibition. This allows the conversion of analog signals at the input of the SMO into a binary code at the output. Levels of input and output SMO signals are consistent. This makes it possible to use SMO in various information processing devices, including neuromorphic systems. SMO is an element with analog processing of information and binary representation of output signals that can be used in various information processing devices and neuromorphic systems.

Keywords — memristor, memristor oscillator, symmetrized memristor oscillator, Schmitt trigger.

REFERENCES

- [1] Chua L. O. Memristor—Missing Circuit Element // IEEE Trans. CircuitTheory. 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] Itoh M., Chua L O. Memristor Oscillators // Int. J. Bifurcation Chaos. 2008. V.18. № 11. P. 3183–3206.
- [4] Zidan M.A., Omran H, Smith C., 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.
- [5] Radwan A.G., Fouda M.E. On the Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor, Studies in Systems, Decision and Control, vol. 26. Springer International Publishing (2015)
- [6] Buscarino A., Fortuna L., Frasca M., Gambuzza L. A gallery of chaotic oscillators based on HP memristor // International Journal of Bifurcation and Chaos 23(5), 1330,015 (2013)
- [7] 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.
- [8] Fouda M.E., Khatib M.A., Mosad A.G., Radwan A.G. Generalized analysis of symmetric and asymmetric memristive two-gate relaxation oscillators // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, vol. 60, no. 10, p. 2701–2708
- [9] Vourkas I., Georgios Ch. Sirakoulis G.C. Memristor-Based Nanoelectronic Computing Circuits and Architectures, Emergence, Complexity and Computation, vol. 19, Springer International Publishing (2016)
- [10] Rakitin V.V., Rusakov S.G. Memristor oscillator Schmitt trigger with multiple steady states of dynamic equilibrium // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2016. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2016. Part I. P. 79-85.