

## НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.372.061

### ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕЗРЕАКТИВНЫХ ДВУХМЕМРИСТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

© 2019 г. В. В. Ракитин<sup>1</sup>, С. Г. Русаков<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,  
Российская Федерация, 124365 Москва, Зеленоград, ул. Советская, 3

\*E-mail: rusakov@ippm.ru

Поступила в редакцию 10.06.2018 г.

После доработки 23.07.2018 г.

Принята к публикации 27.07.2018 г.

Рассмотрен новый класс безреактивных мемристорных генераторов. Показано, что двухмемристорный генератор обладает широкими функциональными возможностями по управлению и модуляции выходных сигналов. Исследованы различные режимы работы таких генераторов, в том числе, характерные для искусственных нейронов режимы, такие как возбуждение и торможение, управление пачками импульсов, изменение частоты импульсов в пачке.

DOI: 10.1134/S0033849419060081

#### ВВЕДЕНИЕ

Мемристор – двухполюсный прибор, изменение сопротивления которого определяется величиной протекавшего через него заряда [1]. Благодаря такой особенности функциональные возможности схем на мемристорах могут быть существенно расширены. Мемристорные приборы, выполненные на наноразмерных структурах “металл–диэлектрик–металл”, легко интегрируются в кремниевую технологию. Совместимость с кремниевой КМОП технологией обеспечивает новые функции интегральных схем с мемристорными приборами.

Первые мемристорные приборы получены на основе тонких оксидных пленок  $TiO_x$  [2]. Продолжаются активные альтернативные исследования различных физических принципов и наноструктур, направленных на создание новых вариантов мемристорных приборов, в том числе в российских научных центрах (см., например, [3–5]).

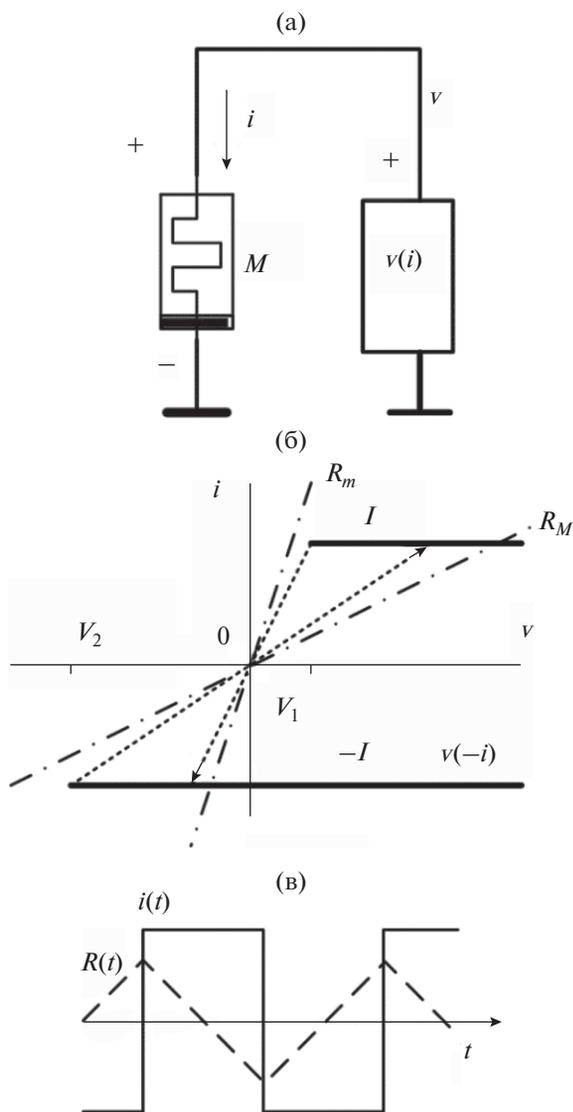
По оценке специалистов очень перспективным является разработка на базе мемристоров искусственных нейронных сетей, где мемристорам отводится роль аналоговой памяти [6–10]. Мемристоры могут использоваться также для построения моделей самих нейронов, в частности, импульсных нейронов и генерирующих нейронов. В их составе обычно присутствуют стандартные элементы аналоговой техники: усилители, компараторы, обеспечивающие пороговые свойства, реактивные элементы (индуктивности и конденсаторы), определяющие динамику поведения. Для интегральной реализации искусственных нейронов важным свойством является возможность построе-

ния мемристорных генераторов без реактивных элементов.

Идея конструирования безреактивных мемристорных генераторов [11–18] представляется перспективной. В безреактивных генераторах на мемристорах для обеспечения генерации вместо традиционных процессов заряда и разряда реактивного элемента используется обратимое изменение величины сопротивления мемристора при изменении знака протекающего тока [11]. В результате в такой схеме можно исключить специальные реактивные элементы. Паразитные реактивные емкости в составе транзисторов, мемристоров, резисторов влияют на скорости переходных быстрых процессов, но не определяют основные свойства генераторов.

В настоящее время уже предложены различные варианты безреактивных мемристорных генераторов [12–17]. Как правило, они содержат двухпороговый компаратор, на вход которого поступает сигнал, пропорциональный сопротивлению мемристора [12]. Выход компаратора управляет током через мемристор. При достижении верхнего или нижнего порога компаратор переключается, изменяя направление тока через мемристор. Таким образом, на выходе двухпорогового компаратора формируется периодическая последовательность прямоугольных импульсов.

Описаны варианты генераторов, в которых для улучшения характеристик используется два мемристора [13–15]. Однако не рассмотрены дополнительные возможности схемы, связанные с наличием двух инерционных приборов.



**Рис. 1.** Поведение автогенераторной схемы на одном мемристоре: а – структурная схема, б – ВАХ двухпорогового компаратора с фазовой траекторией генератора, в – форма переходных процессов.

Целью данной работы является анализ безреактивных двухмемристорных генераторов с учетом появляющихся дополнительных степеней свободы. Увеличение степеней свободы определяет новые возможности генераторных схем, например, для управления и модуляции последовательностью двоичных выходных сигналов.

## 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДВУХМЕМРИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

### А. Предпосылки. Условия генерации одномемристорных генераторов

В линейно-дрейфовой модели мемристоров с токовым управлением [2] сопротивление мемри-

стора  $R$  лежит в диапазоне от минимальной величины  $R_m$  до максимальной величины  $R_M$ . Сопротивление изменяется при протекании тока  $i$  линейно. При подключении мемристора анодом к положительному потенциалу (рис. 1а) имеет место соотношение  $dR/dt = -ki$ , где  $k$  определяет скорость переключения мемристора.

Следуя результатам анализа, выполненного в работе [18], для возбуждения мемристорного генератора достаточно подсоединить мемристор к нелинейному активному двухполюснику (рис. 1а) с вольт-амперной характеристикой (ВАХ)  $v(i)$ , удовлетворяющей следующим условиям:

а) ВАХ не должна проходить через нулевую точку;

б) при положительных токах должно выполняться условие  $v(-i) > -R_m i$ , а при отрицательных токах  $v(-i) > -R_M i$ .

Таким требованиям может удовлетворять, например, схема двухпорогового компаратора с отрицательной обратной связью [13]. Схема имеет два пороговых напряжения:  $V_1$  и  $-V_2$ . Возможный вариант ВАХ такой схемы, зеркальной по отношению к оси токов, показан на рис. 1б. ВАХ имеет две ветви: верхнюю ветвь со значением тока  $i = I$  при  $v > V_1$  и нижнюю – со значением тока  $i = -I$  при  $v > -V_2$ .

При подключении к компаратору мемристора с сопротивлением, лежащим внутри интервала  $V_1/I$  и  $V_2/I$ , через мемристор может протекать ток любого знака. При положительных токах сопротивление мемристора  $R$  уменьшается, напряжение  $v$  уменьшается и стремится к  $V_1$ , затем происходит переключение компаратора. При отрицательных токах сопротивление  $R$  возрастает, напряжение  $v$  уменьшается от  $-V_1$  до  $-V_2$ , пока схема не переключится. Таким образом, в схеме происходит пилообразное изменение переменной – сопротивления мемристора  $R$ , и на выходе имеет место знакопеременная последовательность прямоугольных импульсов (рис. 1в).

### Б. Условия генерации двухмемристорных генераторов

При последовательном встречном подключении к мемристору второго мемристора (рис. 2а) анализ поведения схемы значительно усложняется. Состояние схемы описывается двумя переменными  $R_1$  и  $R_2$ , которые изменяются во времени под действием тока  $i \neq 0$ . При одинаковых встречно-включенных мемристорах их суммарное сопротивление  $R = R_1 + R_2$  не меняется в пределах ограничений.

На фазовой плоскости с осями координат  $R_1-R_2$  этому соответствует движение по прямой с наклоном  $45^\circ$  с направлением снизу вверх при  $i = I$  и сверху вниз при  $i = -I$  (рис. 2б). Существуют две устойчивые точки  $(R_{m1}, R_{M2})$  при  $i = I$  и  $(R_{M2}, R_{M1})$  при  $i = -I$ , обусловленные выходом сопротивлений мемристоров на граничные значения. Ограничивая диапазоны изменения сопротивлений мемристоров выбором пороговых напряжений компараторов  $(R_{M1} + R_{m2} < V_2/I$  и  $R_{M2} + R_{m1} > V_1/I)$ , можно эти устойчивые точки исключить из траекторий. В этом случае при любом начальном состоянии система переходит в режим генерации, цикл которого показан на рис. 2б. В схеме протекает знакопеременный ток, а форма изменения  $R$  этом случае – трапецеидальная.

В рассмотренном примере условием возбуждения является различие в диапазонах изменения сопротивлений мемристоров.

Для обеспечения возбуждения схемы с одинаковыми мемристорами достаточно обеспечить различие в скоростях мемристоров. Чтобы в схеме (рис. 2а) с ВАХ  $v(i)$  компаратора возникла генерация, достаточным условием является  $k_1 > k_2$ . Тогда на координатной плоскости (рис. 3а) наклон фазовых траекторий  $Tr$  будет меньше. На рис. 3а, иллюстрирующем циклическое поведение двухмемристорного генератора, показаны две пороговые линии, соответствующие выходным напряжениям компаратора  $V_1$  и  $V_2$ . Так как ток через мемристоры одинаков, то пороговые линии проходят под углом  $45^\circ$ . При достижении фазовой траектории пороговой линии происходит переключение компаратора. Изображающая точка будет двигаться по фазовой траектории в противоположном направлении.

Если траектория  $Tr_0$  упирается в обе пороговые линии, переходные процессы аналогичны процессам в одномемристорном генераторе – пилообразные периодические колебания величин сопротивлений. Такая траектория является устойчивой траекторией. Если траектория ( $Tr_1$ ) упирается в границу диапазона (рис. 3а), то далее изображающая точка двигается по границе ( $Tr_{1a}$ ) и затем достигает устойчивой точки  $O$ .

Для обеспечения генерации требуется перевести точку  $(R_1, R_2)$  левее пороговой линии  $V_1$ . Это достигается смещением самой точки, либо перемещением линии  $V_1$ . В первом случае нужно, подав отрицательный ток в  $M_2$ , перевести систему на траекторию  $Tr_2$ . Во втором случае, подав отрицательный ток на оба мемристора, нужно сдвинуть обе пороговые линии (рис. 3б). В результате происходит смена полярности тока, и система

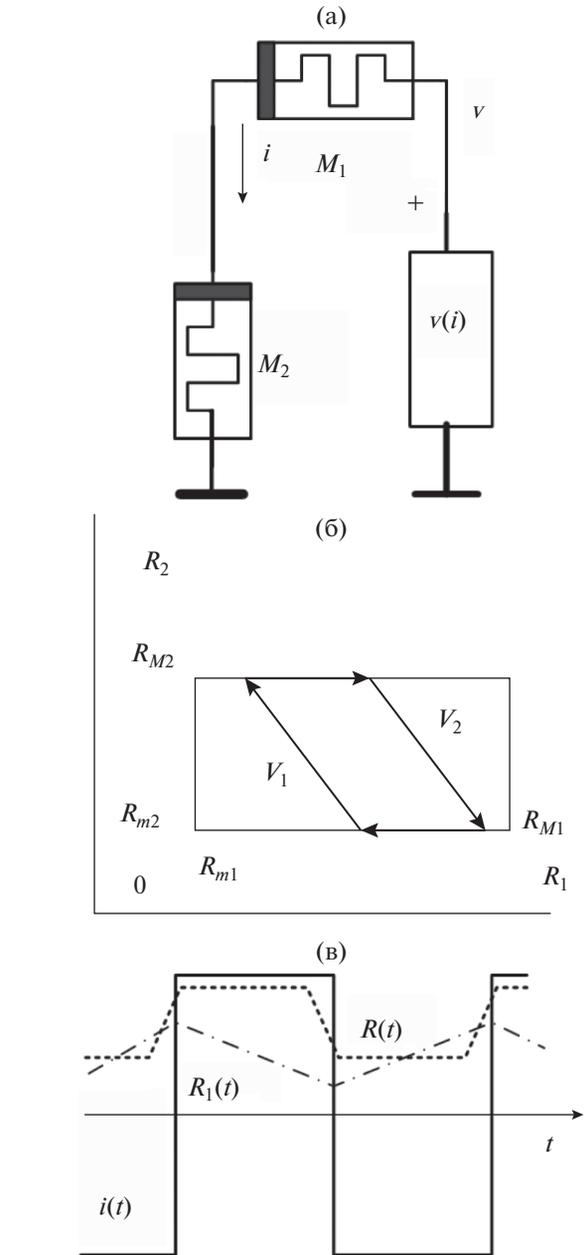


Рис. 2. Поведение двухмемристорной автогенераторной схемы (ДМГ): а – структурная схема, б – координатная плоскость с осями координат  $R_1-R_2$ , в – форма переходных процессов.

двигается по новой траектории ( $Tr_3 - Tr_{3a} - Tr_{3b}$ ). После окончания сигнала, если система оказалась на устойчивой траектории, имеют место периодические пилообразные колебания.

Вводя дальнейшие усложнения, в том числе зависимость скорости переключения мемристоров от знака тока или взвешенное суммирование напряжений от мемристоров на входе компаратора, можно существенно изменять поведение ДМГ.

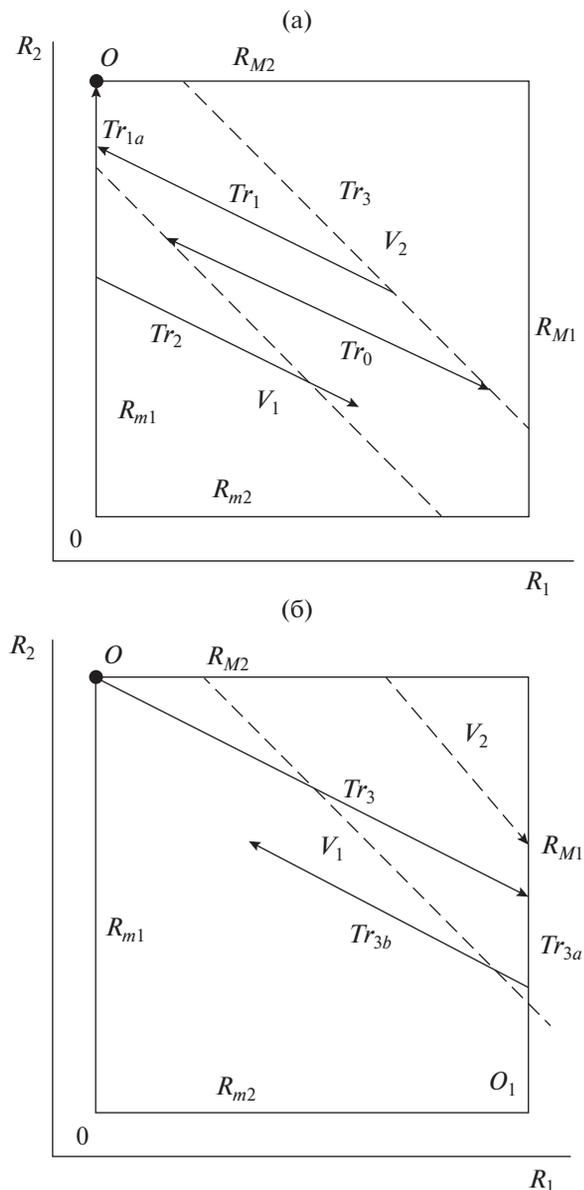


Рис. 3. Фазовые траектории ДМГ: а – в отсутствии внешних сигналов, б – при наличии внешнего сигнала.

### 2. МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ДВУХМЕМРИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

С применением линейно-дрейфовой модели мемристора поведение ДМГ описывается кусочно-линейными уравнениями:

$$\frac{dR_1}{dt} = -f(R_1)k_1(i), \tag{1}$$

$$\frac{dR_2}{dt} = -f(R_2)k_2(i) + i_{вх}. \tag{2}$$

Здесь  $f(\cdot)$  – оконная функция, учитывающая зависимость скорости переключения от величины сопротивления мемристора,  $i = F[a_1(i)R_1 + a_2(i)R_2 +$

$+ v_{вх} - V_j] = \pm I$  – ВАХ двупорогового компаратора,  $F(v)$  – функция, обратная к функции  $v(i)$ ,  $V_j$  принимает значения  $V_1$  или  $V_2$ ,  $k_1(i)$  и  $k_2(i)$  – коэффициенты скорости изменения состояния мемристоров, их отношение определяет наклон траектории на фазовой плоскости, коэффициенты  $a_1(i)$  и  $a_2(i)$  определяют условия переключения компаратора – наклон пороговых линий на фазовой плоскости,  $i_{вх}$  – входной ток, управляющий мемристором  $M_2$ ,  $v_{вх}$  – входное управляющее напряжение. Простейшая оконная функция имеет вид:  $f(R_i) = 1$  если  $R_m < R < R_M$ , иначе  $f(R) = 0$ . В этом случае правые части системы уравнений (1) и (2) – кусочно-постоянные функции. Поэтому изменение переменных  $R_1$  и  $R_2$  во времени имеет кусочно-линейный характер, а их фазовые траектории являются отрезками прямых линий (см. рис. 3).

Нелинейная система (1), (2) задает сложный характер поведения переменных. Выбором ее коэффициентов и внешних сигналов можно получить различные режимы поведения, в том числе, аналогичные поведению искусственных нейронов (ИН) [6]. Далее обсуждаются некоторые возможные режимы, соответствующие такой модели.

В приведенных ниже примерах используются следующие безразмерные значения параметров системы:  $I = \pm 1$ ,  $R_{m1} = R_{m2} = 1$ ,  $R_{M1} = R_{M2} = 3$ ,  $V_1 = 3.8$ ,  $V_2 = 4.2$ . Заметим, что если размерность сопротивлений определяется в кОм, напряжений – В, токов – мА и  $[k] = 10^9 \text{ ВА}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , то размерность времени получаем в мс.

*Пример 1* (рис. 4). Управление ДМГ внешними сигналами.

Параметры для примера 1:  $k_1 = 1$ ,  $k_2(1) = 0.2$ ,  $k_2(-1) = 0.1$ ,  $a_1 = a_2 = 1$ .

Отличие коэффициентов скоростей изменения состояния мемристоров  $M_1$  и  $M_2$  превращает ДМГ в моностабильный генератор с устойчивым состоянием  $O$  (рис. 3). Однако переход из возбужденного состояния в заторможенное состояние происходит за несколько периодов колебаний. На выходе ДМГ генерируется пачка импульсов, количество которых пропорционально амплитуде входного сигнала. Длина пачки и ее задержка зависят от момента поступления возбуждающего сигнала по отношению к фазе колебания.

*Пример 2.* ДМГ с переменной частотой импульсов пачки (рис. 5).

Параметры примера 2:  $k_1(1) = -0.5$ ,  $k_1(-1) = -0.35$ ,  $k_2(1) = 0.25$ ,  $k_2(-1) = 0.1$ ,  $a_1(1) = a_2(-1) = 1.2$ ,  $a_1(-1) = a_2(1) = 0.8$ .

В данном примере линии ограничения на фазовой плоскости образуют угол. Первоначально

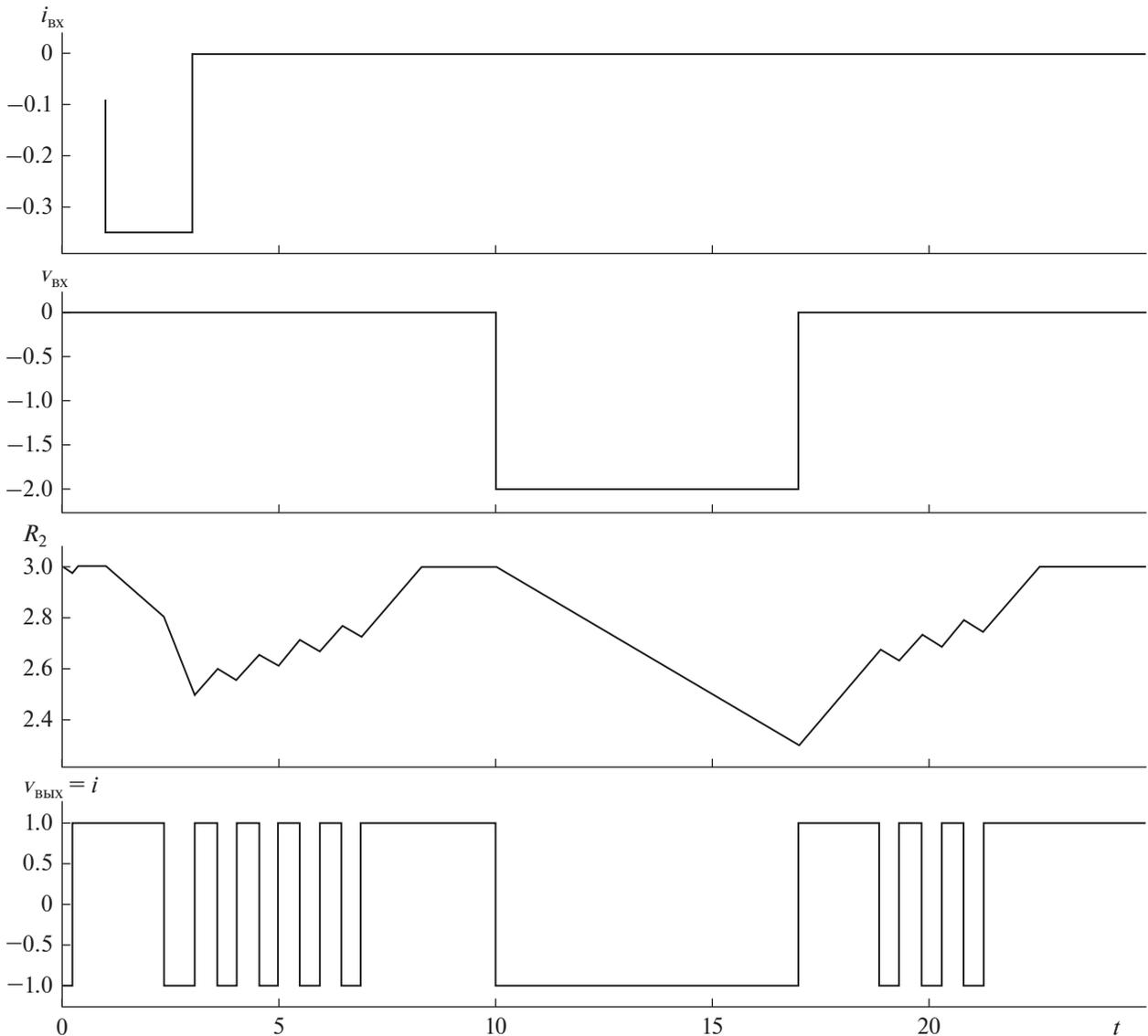


Рис. 4. Сигналы ДМГ при внешнем управлении.

состояние ДМГ задается точкой ( $R_1 = 3, R_2 = 1.4$ ), далее происходит автономное движение по траектории к состоянию равновесия  $O$ . Траектория движения системы внутри угла из линий ограничения состоит из отрезков, длина которых возрастает, что приводит к увеличению периода колебаний выходного сигнала.

В обычных аналоговых схемах такое поведение достигается благодаря высокой добротности колебательной системы на реактивных элементах. В мемристорных безреактивных генераторах разнообразие поведения достигается за счет нелинейности и инерционности мемристоров в сочетании с пороговыми свойствами компараторов. Простота конструкции и малые размеры мемристоров в сочетании с возможностью реализации

компараторов на простых КМОП схемах, а также на перспективных приборах с S-образной ВАХ, открывают широкие возможности интегральной реализации генераторов импульсных последовательностей.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХМЕМРИСТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Простейший ДМГ кроме мемристоров содержит двухпороговый компаратор (рис. 6). Для управления режимами ДМГ в его состав включены сумматор  $\Sigma$ , дополнительные источники тока и управляемый компаратором переключатель  $S$  (рис. 6). В качестве источников тока могут использоваться стандартные КМОП ключи. Внеш-

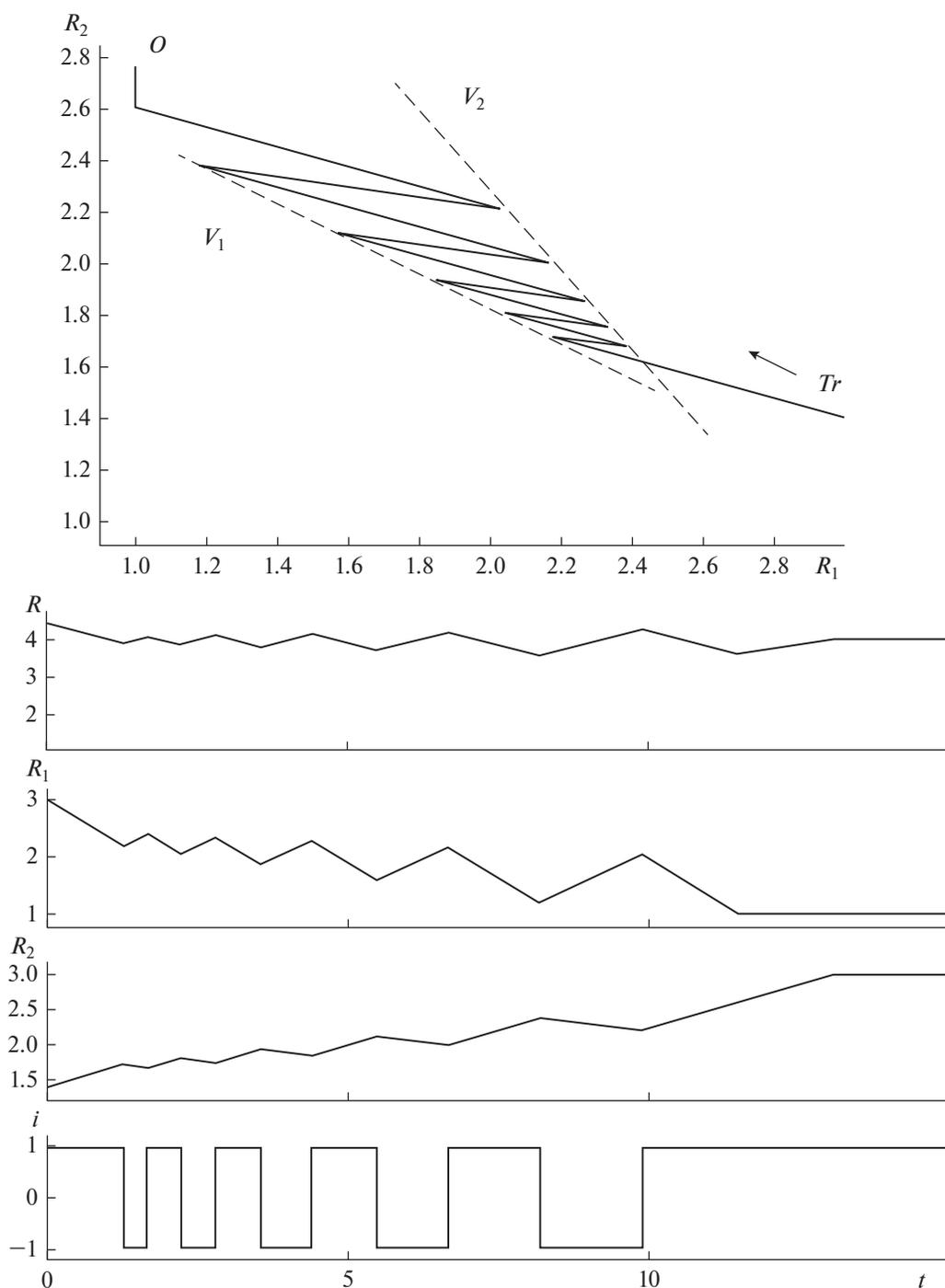


Рис. 5. Фазовый портрет ДМГ и форма сигналов с изменяющейся частотой.

ние сигналы управления подаются на общий вход  $v_{вх}$  или на второй мемристор  $i_{вх}$ .

Источники тока  $i+$  и  $i-$  позволяют изменять соотношение скоростей изменения состояния мемристоров в зависимости от полярности выходного сигнала  $v_{вых}$ . Наличие двух сопротивлений  $r_{2+}$  и  $r_{2-}$  позволяет изменять условия пере-

ключения компаратора (положение линий  $V_1$  и  $V_2$  на фазовой плоскости, рис. 3). Источники тока и сопротивления можно сделать перестраиваемыми, используя дополнительные мемристоры.

Рассматриваемая схема является универсальной. Она позволяет демонстрировать следующие режимы импульсных и генераторных нейронов:

- 1) возбуждение и торможение;

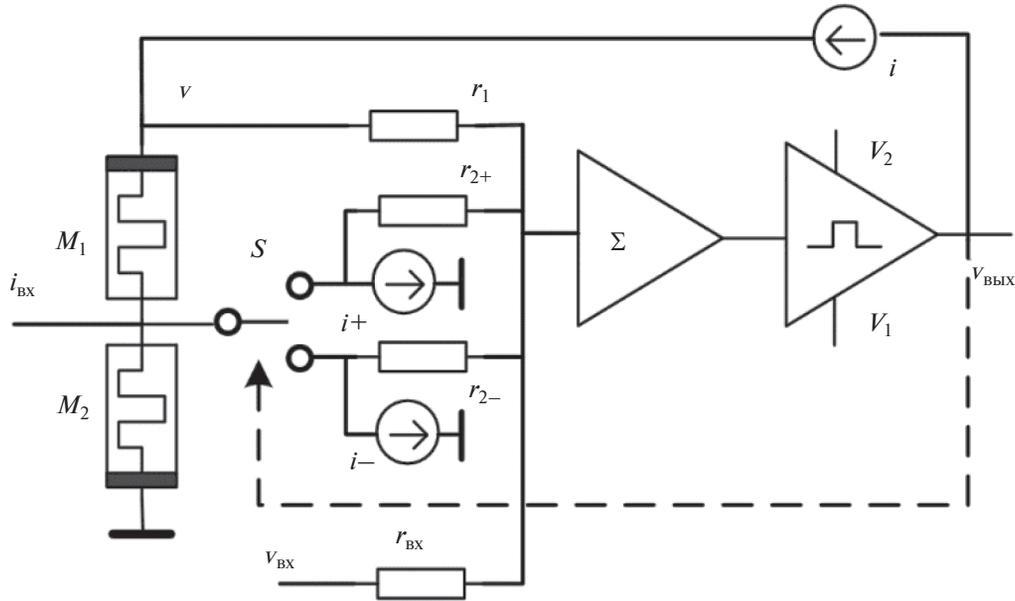


Рис. 6. Блок-схема ДМГ.

2) возбуждение с регулируемым количеством импульсов в пачке при превышении порогового уровня входным сигналом;

3) возбуждение с изменяемой частотой выходных импульсов как с убыванием, так и возрастанием частоты.

Ранее для реализации подобных режимов применялись сложные схемы.

Первый из перечисленных режимов реализуется простейшим ДМГ. Пусть ДМГ находится в возбужденном состоянии. Уменьшая  $V_1$  отрицательным импульсом тока  $i_{BX}$ , схема тормозится и оказывается в устойчивом состоянии  $O$  с  $v_{V_{ВЫХ}} = 1$  (рис. 3а). Увеличивая оба порога отрицательным импульсом напряжения  $v_{BX}$ , обеспечивается движение по траектории  $Tr_3 - Tr_{3a}$  с момента пересечения линии  $V_1$  изображающей точки системы  $v_{V_{ВЫХ}} = -1$  (рис. 3б). После окончания импульса  $V_1$  и  $V_2$  возвращаются к прежним значениям, и начинается движение по траектории  $Tr_{3b}$ . В частности, эта траектория может совпадать с траекторией  $Tr_1$ . Тогда система вернется в состояние  $O$ , сформировав один широкий положительный импульс. В противном случае она возбуждается и формирует последовательность импульсов до следующего торможения.

Второй и третий режимы показаны на приведенных примерах 1 и 2 предыдущего раздела.

Отметим отличие поведения типового мемристорного генератора от классических моделей искусственных нейронов. У ДМГ происходят переключения между низким и высоким уровнями,

как и у стандартных КМОП схем. У обычных искусственных нейронов при фиксированной форме импульса меняется интервал между ними. При необходимости у ДМГ также можно сформировать короткие импульсы, но это приведет к расширению полосы частот. Другим достоинством ДМГ является возможность кодировать информацию как частотой, так и постоянной составляющей импульсной последовательности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены условия колебаний ДМГ. Показана возможность обеспечения различных режимов поведения ДМГ, аналогичных поведению искусственных нейронов. Приведены примеры, показывающие существенное отличие рассматриваемых ДМГ предложений от традиционных систем, выполняющих похожие функции. В частности, снимается требование высокой добротности колебательной системы на реактивных элементах в традиционных аналоговых схемах.

Преимуществом ДМГ является возможность кодирования информации как частотой, так и постоянной составляющей импульсной последовательности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-07-00498).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chua L., Kang S.M. // Proc. IEEE. 1976. V. 64. № 2. P. 209.

2. *Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R.* // Nature. 2008. V. 453. № 7250. P. 80.
3. *Рехвиашвили С.Ш., Потапов А.А.* // РЭ. 2012. Т. 57. № 2. С. 207.
4. *Лапкин Д.А., Малахов С.Н., Демин В.А., Чвалун С.Н.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 24. С. 24.
5. *Бобылев А.Н., Удовиченко С.Ю.* // Микроэлектроника. 2016. Т. 45. № 6. С. 434.
6. *Thomas A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. № 9. P. 1.
7. *Maan A.K., Jayadevi D.A., James A.P.* // IEEE Trans. 2017. V. NNL-28. № 9. P. 1734.
8. *Pershin Y.V., Di Ventra M.* // Neural Networks. 2010. V. 23. № 7. P. 881.
9. *Антонов И.Н., Белов А.И., Михайлов А.Н. и др.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 8. С. 880.
10. *Демин В.А., Емельянов А.В., Лапкин Д.А. и др.* // Кристаллография. 2016. Т. 61. № 6. С. 958.
11. *Radwan A.G., Fouda M.E.* On the Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2015.
12. *Zidan M., Omran H., Radwan A.G., Salama K.N.* // Electronics Lett. 2011. V. 47. № 22. P. 1220.
13. *Khatib M.A., Mosad A.G., Fouda M.E. et al.* // Proc. IEEE Int. Conf. Computer Engineering Systems (ICCES'2012). Cairo. 27–29 Nov. 2012. N.Y.: IEEE, 2012. P. 98.
14. *Fouda M.E., Mosad A.G., Khatib M.A., Radwan A.G.* // IEEE Trans. 2013. V. CS.I-60. № 10. P. 2701.
15. *Zidan M., Omran H., Smith C. et al.* // Int. J. Circuit Theory and Applications. 2014. V. 42. № 11. P. 1103.
16. *Mosad A.G., Khatib M.A., Fouda M.E. et al.* // Microelectronics J. 2013. V. 44. № 9. P. 814.
17. *Hezayyin H.G., Ahmed G.M., Fouda M.E. et al.* // Proc. 2016 IEEE 59 th Int. Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Abu Dhabi. 16–19 Oct. N.Y.: IEEE, 2016. P. 7870128.
18. *Ракитин В.В., Русаков С.Г.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 6. С. 601.