

07

## Явление бистабильности в одиночных и связанных осцилляторах на основе VO<sub>2</sub>-переключателей

© М.А. Беляев, В.В. Путролайнен, А.А. Величко

Петрозаводский государственный университет

E-mail: biomax89@yandex.ru

Поступило в Редакцию 17 июля 2016 г.

Исследованы новые режимы работы одиночных и связанных осцилляторов в схемах на основе планарных VO<sub>2</sub>-переключателей. Обнаружено явление бистабильности, заключающееся в управляемом включении и выключении автоколебаний внешним импульсом, перспективное для создания осцилляторных элементов памяти, и реализации режима импульсной связи искусственных нейронных сетей (ИНС). Длительность импульса включения не менее  $\sim 20 \mu\text{s}$ , а выключения  $\sim 30 \text{ ns}$ . Показано, что для связанных осцилляторов область существования данного эффекта в координатах пороговых напряжений существенно шире, чем в одиночном контуре, и величина гистерезиса включения может достигать  $2V$ . Обнаружен режим инициации пакетов переключений, моделирующих пачечную активность ИНС.

Использование искусственных нейронных сетей (ИНС) [1] для обработки информации позволяет преодолеть трудности, возникающие при использовании традиционных вычислительных схем в таких областях, как распознавание изображений и речи [2]. Интенсивное изучение этой проблемы началось в 80-х годах прошлого века [3]. Одним из важных направлений развития ИНС является изучение колебательных режимов нейронных сетей, например, на основе слабо связанных фазовых осцилляторов (модель Курамото) [4]. В данной модели при определенной величине параметра связи система демонстрирует фазовую синхронизацию [4]. Несмотря на большое количество работ, посвященных моделированию подобных колебательных систем, число работ по их практическому воплощению и экспериментальному исследованию невелико [5,6,7]. Одним из технических решений по реализации осцилляторных контуров является использование материалов, обладающих фазовым переходом металл–полупроводник (ФПМП), таких как

диоксид ванадия [6]. Благодаря наличию ФМПП  $\text{VO}_2$ -структуры обладают эффектом электрического переключения с S-образной ВАХ [8], схемы с подобными переключателями демонстрируют широкий спектр колебательных режимов, применяемых для ИНС [9]. Например, очень актуально исследование би- и мультстабильности колебательных систем, а также режимов импульсных связей, характерных для ИНС [10].

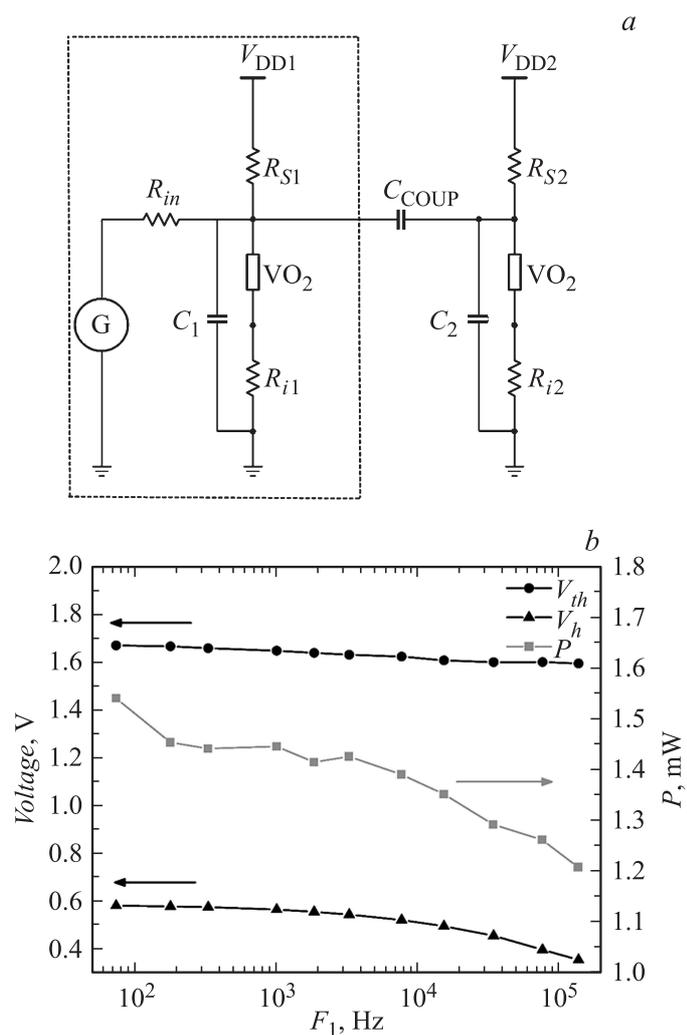
В данной работе нами были исследованы ранее не наблюдаемые режимы работы одиночного и связанного колебательных контуров в схемах на основе планарных  $\text{VO}_2$ -переключателей, показаны условия управления генерацией внешним импульсом, с явлением бистабильности, и режим инициации пакетов переключений моделирующих пачечную активность ИНС.

Тонкие пленки диоксида ванадия получались методом магнетронного распыления на установке AJA Orion на подложки сапфира (R-плоскость). Пленки получались в два этапа: сначала выполнялось нанесение слоя аморфного оксида ванадия при комнатной температуре распылением металлической мишени (скорость натекания аргона и кислорода 14 и  $2 \text{ cm}^3/\text{min}$  соответственно, давление в камере  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}$ ), а затем производился отжиг в атмосфере кислорода при температуре  $480^\circ\text{C}$  в течение 40 min. После получения пленки на ее поверхности оптической литографией формировались планарные микроструктуры, представляющие собой двухслойные металлические контакты (V–Au) толщиной порядка 50 nm. Ширина контактов составляла  $10 \mu\text{m}$ , а зазор между ними —  $2\text{--}3 \mu\text{m}$ .

Измерения электрических свойств полученных структур проводились в экранированных от внешних электрических помех условиях, необходимых для минимизации стороннего шума, влияющего на динамику работы схем, при комнатной температуре  $T_0 \sim 25^\circ\text{C}$ . Для исследования вольт-амперных характеристик использовался источник-измеритель Keithley 2400, исследование импульсных характеристик, динамики одиночных и связанных осцилляторов проводилось на 4-канальном осциллографе LeCroy waveRunner 44Xi-A с максимальной частотой дискретизации до 5 GS/s.

ВАХ  $\text{VO}_2$ -структур имели S-образную форму с пороговым напряжением включения  $V_{th}$  в диапазоне 1.6–1.8 V (выключения  $V_h$  в диапазоне 0.55–0.7 V) и динамическими  $R_{off} \sim 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{on} \sim \Omega$  в полупроводниковом и металлическом состояниях соответственно.

Для исследования автоколебаний в одиночном контуре была выбрана структура со следующими параметрами:  $V_{th} = 1.67 \text{ V}$ ,  $V_h = 0.58 \text{ V}$ ,



**Рис. 1.** *a* — схемы одиночного (пунктирный контур) и связанного осцилляторов; *b* — зависимость  $V_{th}$ ,  $V_h$ ,  $P$  от частоты автоколебаний ( $F_1$  — частота первой гармоники спектра); *c* — осциллограмма напряжения на переключателе при включении и выключении автоколебаний прямоугольными импульсами.

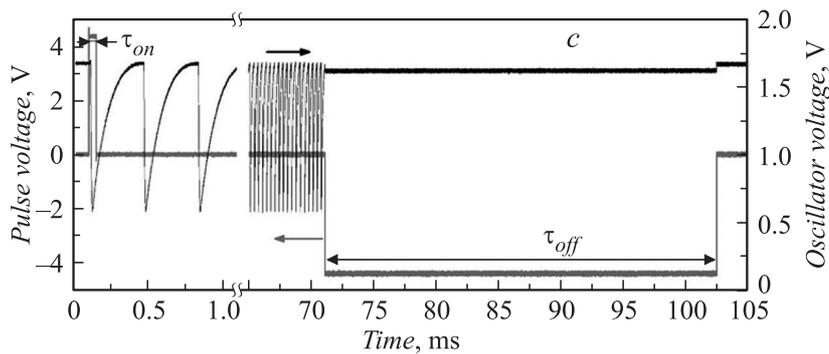


Рис. 1 (продолжение).

$R_{off} = 1.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{on} = 50 \Omega$ . Автоколебательная схема одиночного осциллятора, используемая в эксперименте, показана на рис. 1, *a* (где  $R_i = 10 \Omega$ ,  $R_s = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 100 \text{ nF}$ ,  $V_{DD} = 60\text{--}70 \text{ V}$ ). Колебания одиночного осциллятора представляют собой последовательную зарядку параллельной емкости  $C$  и ее разрядку в момент переключения  $\text{VO}_2$ -структуры в низкоомное состояние. Ток зарядки ограничивается  $R_s$ , а ток разрядки — сопротивлением самой структуры  $R_{on}$  и токовым резистором  $R_i$ . Возникновение автоколебаний обусловлено наличием в схеме  $\text{VO}_2$ -переключателя, имеющего участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением и выводом рабочей точки схемы на этот участок. К схеме через сопротивление  $R_{in} = 30 \text{ k}\Omega$  подключался генератор (с выходным сопротивлением  $\sim 50 \Omega$ , рис. 1, *a*), с помощью которого можно было подавать сигналы произвольной формы.

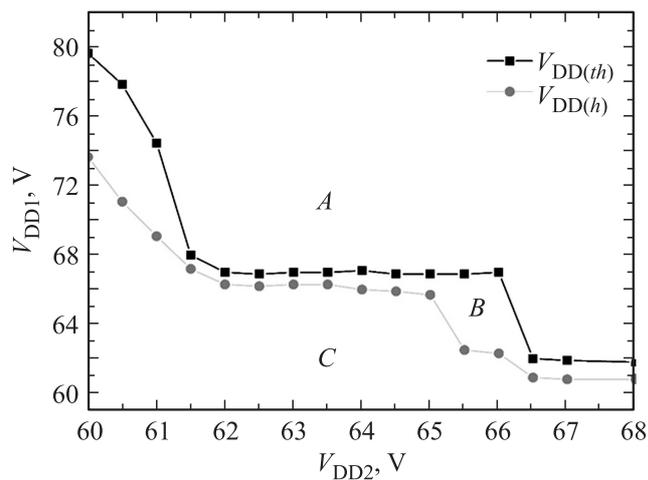
Первоначально исследования одиночного осциллятора проводились при выключенном генераторе  $G$  ( $R_{in}$  соединен с земляным потенциалом). Пороговое значение напряжения питания, при котором возникли автоколебания с частотой  $F = 3.3 \text{ kHz}$ , составляло  $V_{DD(th)} = 68 \text{ V}$ . Следует отметить, что после возбуждения осцилляций автоколебания сохранялись при незначительном снижении напряжения питания вплоть до напряжения поддержания  $V_{DD(h)} = 67.7 \text{ V}$ . Наблюдаемый гистерезис включения автоколебаний от напряжения  $V_{DD}$  может быть объяснен различием параметров ВАХ ( $V_{th}$ ,  $V_h$ ) в статическом и динамическом режимах. Измеренная зависимость этих параметров от частоты автоколебаний представлена на рис. 1, *b* (частота варьировалась величиной

емкости  $C$ ). Видно, что в состоянии, близком к статическому (низкие частоты), значения пороговых параметров максимальны, а с увеличением частоты наблюдается общее снижение  $V_{th}$  и  $V_h$ . Это, по нашему мнению, обусловлено общим разогревом структуры на  $\Delta T_0$  в силу того, что за один период автоколебания канал переключения не успевает остыть до равновесной температуры статического состояния. При этом подводимая к переключателю мощность  $P$  также падает с ростом частоты (рис. 1, *b*), что косвенно указывает на рост средней температуры канала. Линейные зависимости  $V_{th}(T)$  были получены ранее в работе [11]. Если снижение  $V_{th}$  составляет 4–5% от максимальной величины при изменении частоты от 100 до 3300 Hz, то, учитывая зависимости  $V_{th}(T)$ , можно оценить увеличение  $T_0$  на  $\Delta T_0 \sim 1-2^\circ\text{C}$ .

Гистерезис включения автоколебаний позволяет управлять осцилляциями с помощью внешнего импульса при условии, что  $V_{DD}$  находится внутри диапазона ( $V_{DD(th)} > V_{DD} > V_{DD(h)}$ ). При подаче управляющего прямоугольного импульса амплитудой  $\sim 4\text{ V}$ , с генератора  $G$  положительной полярности схема начинала осциллировать, импульс отрицательной полярности выключал автоколебания (рис. 1, *c*). Минимальная длительность импульса включения составляла  $\tau_{on} \sim 20\ \mu\text{s}$ , а выключения  $\tau_{off} \sim 33\ \text{ms}$ . Значительное превышение  $\tau_{off} \gg \tau_{on}$ , по-видимому, связано с длительным временем остывания канала структуры до равновесной температуры. Управляемый переход из выключенного во включенное состояние, с сохранением этого состояния во времени, можно назвать явлением бистабильности одиночного контура и использовать его для создания осцилляторных элементов с эффектом памяти.

Следующим этапом эксперимента было исследование подпорогового режима ( $V_{DD} < V_{DD(h)}$ ) работы одиночного осцилляторного контура. Для этого напряжение питания было снижено до  $V_{DD} = 65\text{ V}$ , при котором автоколебания в контуре отсутствовали. Внешний сигнал инициировал возбуждение автоколебаний с последующим их спонтанным выключением. Длительность возбужденного состояния имеет стохастический характер и зависит от величины  $V_{DD}$ , чем она меньше отличается от  $V_{DD(h)}$ , тем длительность больше. Прекращение автоколебаний связано, по нашему мнению, со случайной флуктуацией  $V_{th}$  [12]. Подобный режим генерации пакетов импульсов тока можно ассоциировать с пачечной активностью ИНС, а при соединении подобных осцилляторов в сеть они могут работать в режиме импульсных связей.

Далее, исследовалась динамика переключений системы из двух одиночных осцилляторов, соединенных связующей емкостью  $C_{\text{coup}}$



**Рис. 2.** Области существования различных режимов работы связанных осцилляторов в пространстве питающих напряжений  $V_{DD1}$  и  $V_{DD2}$  ( $A$  — режим генерации,  $B$  — бистабильный режим,  $C$  — режим подавления генерации).

(эквивалентная схема представлена на рис. 1,  $a$ ). Не связанные емкостью осцилляторы генерируют автоколебания на основных частотах  $F_{1(1)} = 3.3$  kHz и  $F_{1(2)} = 3.2$  kHz соответственно. Синхронизация осцилляторов по фазе и частоте в рассматриваемой системе происходит при  $C_{COUP} > 4$  nF, поэтому в работе мы использовали  $C_{COUP} = 100$  nF. После начала генерации осцилляторы синхронизируются в состоянии, близком к противофазе, что вызывает появление двойных пиков на осциллограммах напряжения. Их основные частоты значительно снижаются до значений  $F_{1(1)} = F_{1(2)} = 2.1$  kHz.

Результаты исследования показали, что так же, как и в одиночном осцилляторе, в связанной системе присутствуют пороговые напряжения включения ( $V_{DD1(th)}$ ,  $V_{DD2(th)}$ ) и выключения ( $V_{DD1(h)}$ ,  $V_{DD2(h)}$ ) осцилляций. Зависимость пороговых параметров друг от друга удобнее показать на графике (рис. 2). Можно выделить три области, ограниченные кривыми. В области  $A$  наблюдаются устойчивые осцилляции. Область  $B$  соответствует режиму управления осцилляциями внешним импульсом, аналогично бистабильному режиму, описанному для одиночного контура. Область  $C$  характеризуется прекращением автоколебаний, при

этом если находиться близко к области  $B$ , то возможно наблюдение эффекта пачечной активности (аналогичного наблюдаемому в одиночном контуре), когда осцилляции могут инициироваться импульсом и самопроизвольно прекращаются через некоторое время.

Примечательным фактом является то, что в связанной системе пороговые напряжения могут быть значительно ниже по величине, чем в отдельных одиночных контурах. Также видно, что в области  $B$ , соответствующей явлению бистабильности, ширина гистерезиса может достигать нескольких вольт ( $V_{DD2(th)} - V_{DD2(h)} > 2 \text{ V}$ , в отличие от одиночного осциллятора, где  $(V_{DD(th)} - V_{DD(h)}) \sim 0.3 \text{ V}$ .

Данный факт свидетельствует о взаимном влиянии осцилляторов, способствующем достижению порогового напряжения переключения  $V_{th}$  на  $\text{VO}_2$ -структурах в процессе автоколебаний. Это можно объяснить следующим образом: при зарядке конденсатора первого контура  $C_{(1)}$  переменная составляющая сигнала, проходя через связывающую емкость  $C_{\text{COUP}}$ , складывается с напряжением на  $\text{VO}_2$ -переключателе во втором контуре, в результате чего достигается пороговая величина  $V_{th}$ .

Таким образом, в данной работе продемонстрированы явления бистабильности в одиночном и связанных осцилляторах. Наблюдаемый гистерезис включения в первом случае связываем с тепловыми эффектами и физикой электрического переключения, а во втором — это комбинация тепловых и электрических свойств схемы, проявляющей базовые свойства мультистабильности [10]. Продемонстрированы режимы пачечной активности осцилляторов. Описанные эффекты применимы для создания осцилляторных элементов с эффектом памяти, а также ИНС, функционирующей в режиме импульсных связей.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-19-00135).

## Список литературы

- [1] *Heaton J.* Artificial Intelligence for Humans. Vol. 3. Deep Learning and Neural Networks. Heaton Research, Inc., 2015. 345 p.
- [2] *Bishop C.M.* Neural Network Pattern Recognition. Oxford: Clarendon Press, 1995. 482 p.
- [3] *Hopfield J.J.* // Proc. National Acad. Sci. 1982. V. 79. P. 2554.
- [4] *Strogatz S.H.* // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2000. V. 143. P. 1–20.
- [5] *Kaka S., Pufall M.R., Rippard W.H.* et al. // Nature. 2005. V. 437. P. 389.

- [6] *Shukla N. et al.* // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. P. 4964.
- [7] *Sharma A.A., Bain J.A., Weldon J.A.* // *IEEE J. Explor. Solid-State Comput. Devices Circuits.* 2015. V. 1. P. 58–66.
- [8] *Борисков П.П., Величко А.А., Пергамент А.Л.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2002. Т. 28. В. 10. С. 13–18.
- [9] *Pickett M.D., Medeiros-Ribeiro G., Williams R.S.* // *Nature Mater.* 2013. V. 12. P. 114–117.
- [10] *Клиньшов В.В., Некоркин В.И.* // *УФН.* 2013. Т. 183. С. 1323–1336.
- [11] *Pergament A., Stefanovich G., Velichko A.* // *Phase Transitions.* 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/01411594.2016.1201818>
- [12] *Velichko A.A., Stefanovich G.B., Pergament A.L., Boriskov P.P.* // *Tech. Phys. Lett.* 2003. V. 29. P. 435–437.