

06

Исследование динамических пороговых характеристик VO₂-переключателя в осцилляторном контуре

© М.А. Беляев, А.А. Величко

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия
E-mail: biotax89@yandex.ru

Поступило в Редакцию 23 мая 2019 г.

В окончательной редакции 22 октября 2019 г.

Принято к публикации 5 ноября 2019 г.

Исследована зависимость динамических пороговых характеристик VO₂-переключателя от частоты осцилляций автоколебательного контура. Обнаружен переходный режим осцилляций, связанный с самоподогревом подложки. Предложены аналитические формулы, позволяющие учитывать эти закономерности и имеющие практическую значимость при конструировании осцилляторных нейронных сетей на основе VO₂-переключателей.

Ключевые слова: диоксид ванадия, электрическое переключение, численное моделирование, осцилляторные нейронные сети.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.03.48991.17890

В последние десятилетия активно ведется исследование биоподобных нейронных сетей, которые призваны реализовать эффективное решение задач классификации [1], кластеризации [2], распознавания образов [3]. Актуальным направлением является исследование осцилляторных нейронных сетей (ОНС), где эффекты синхронизации играют первостепенную роль. Большинство ОНС реализует фазовую модель Курамото [4], описывающую динамику связанных осцилляторов с близкими частотами, и модели с захватом частоты в системах с широким частотным диапазоном [5,6]. Общим для всех этих моделей является необходимость установки частот осцилляторов и величин сил связей между ними с высокой точностью.

Автоколебательный контур ОНС содержит элемент с S-образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) [7,8], наиболее распространенным из которых является VO₂-переключатель с фазовым переходом металл–полупроводник (ФПМП) [9]. Использование VO₂-переключателя в качестве модельного объекта [8,10] обусловлено ярко выраженным эффектом электрического переключения с высоким скачком сопротивления до трех порядков и возможностью изготовления планарных и сэндвич-структур с нанометровыми размерами [9,11]. Известно, что электрическое переключение обусловлено ФПМП, который может иметь две составляющие (переход Мотта и Пайерлса) [12]. Тем не менее при невысоких полях, которые реализуются при нормальных условиях, можно считать, что моттовской составляющей можно пренебречь и использовать электротермическую модель с учетом температурной зависимости проводимости VO₂ [13].

В настоящее время модели ОНС основываются на статической ВАХ VO₂-переключателя [7,10], измеряемой при невысокой скорости нарастания напряжения (менее

10 V/s). И если при основных частотах осцилляций до 10 kHz такой подход позволяет получать приемлемую точность при моделировании динамики колебаний [14], то с увеличением частоты необходимо использовать динамическую ВАХ. Это связано с тем, что пороговые напряжения (V_{th} , V_h) динамической ВАХ отличаются от таковых в статической вследствие инертности процессов нагрева и охлаждения подложки в области VO₂-канала. Проблема модификации пороговых параметров переключения V_{th} , V_h с увеличением частоты недостаточно освещена в других работах [14,15], поэтому в данном исследовании мы проанализировали динамику работы VO₂-осциллятора в диапазоне частот 10–10⁷ Hz.

Модель переключателя, созданная в среде Comsol Multiphysics, представляет собой двухэлектродную планарную структуру Au–VO₂–Au с золотыми контактами размером 10 × 10 μm, расстояние между которыми составляет 3 μm. Толщина VO₂-пленки и контактов равна 200 nm. Переключатель располагается на сапфировой подложке размером 100 × 100 × 100 μm. Исходная температура всех компонентов модели составляет $T = 300$ K. Параметры моделирования взяты из нашей предыдущей работы, где было показано соответствие модельных и экспериментальных данных [9] даже при наличии температурного гистерезиса ФПМП с шириной до 5 K. На рис. 1, а представлена модельная статическая ВАХ переключателя, полученная при подаче линейно нарастающего напряжения со скоростью 10 V/s, со следующими пороговыми параметрами: напряжение включения $V_{th}^0 = 4.78$ V, напряжение выключения $V_h^0 = 1.31$ V, сопротивление в высокоомном состоянии $R_{off} = 6$ kΩ, в низкоомном $R_{on} = 75$ Ω (значения сопротивлений получены по линейным аппроксимациям ветвей ВАХ, проходящим через начало координат). Электрическая схема осциллятора представлена на рис. 1, б, дифференциаль-

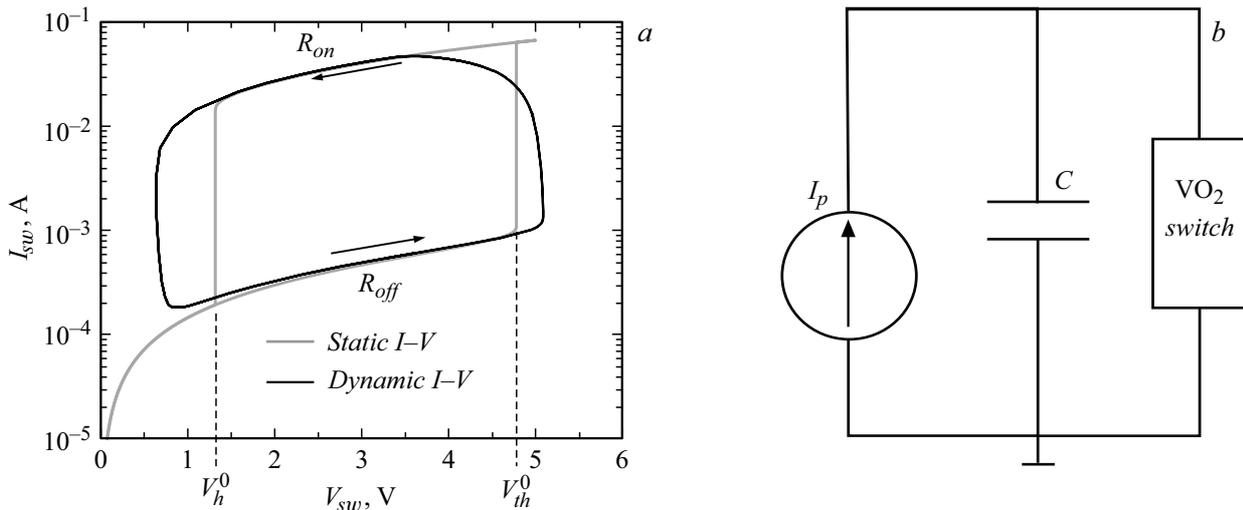


Рис. 1. Модельные статические и динамические (на частоте 100 kHz) ВАХ VO₂-переключателя (а) и электрическая схема осцилляторного контура (b).

ное уравнение, описывающее ее работу, следующее:

$$C \frac{\partial V_{sw}}{\partial t} + \frac{V_{sw}}{R_{sw}} - I_p = 0, \quad (1)$$

где V_{sw} и R_{sw} — напряжение на переключателе и его сопротивление. Автоколебания возникают при выставлении рабочей точки схемы в область отрицательного дифференциального сопротивления ВАХ, их период состоит из времени зарядки конденсатора C на высокоомном участке ВАХ и его разрядки на низкоомном участке. Формула для частоты F_{eq} может быть получена аналитически из решения (1):

$$F_{eq} = \left[C \left(R_{off} \ln \left(\frac{I_p R_{off} - V_h}{I_p R_{off} - V_{th}} \right) + R_{on} \ln \left(\frac{I_p R_{on} - V_{th}}{I_p R_{on} - V_h} \right) \right) \right]^{-1}. \quad (2)$$

Видно, что частота зависит от пороговых характеристик ВАХ и параметров цепи. Зависимость от емкости обратно пропорциональная, поэтому ее вариация в модели в диапазоне 80 pF–10 μF была более предпочтительна для задания значения частоты, а ток I_p , определяющий положение рабочей точки, оставался постоянным: $I_p = 2$ mA. Как показывает эксперимент [15] и настоящая модель, уменьшение емкости в цепи приводит не только к увеличению частоты F осцилляций, но и к изменению пороговых характеристик ВАХ (рис. 1, а). На рис. 2, а показана зависимость V_{th} и V_h от частоты. В связи с этим при подстановке статических пороговых характеристик $V_{th} = V_{th}^0$ и $V_h = V_h^0$ формула (2) дает правильную оценку модельной частоты $F \approx F_{eq}(V_{th}^0, V_h^0)$ только при больших емкостях ($C > 1 \mu F$) и низких частотах ($F < 100$ Hz). Увеличение V_{th} с ростом частоты связано с ростом

скорости нарастания напряжения и появлением неравномерного распределения температуры VO₂-канала. Таким образом, распределение температуры, соответствующее открытому каналу, устанавливается с задержкой и при более высоких значениях V_{th} . Время запаздывания включения τ_{on} можно оценить как $\tau_{on} \approx l/v_p$, где l — характерный размер переключателя, а v_p — скорость распространения волны температуры. Известно, что скорость тепловых волн пропорциональна корню частоты колебаний ($\sim F^{1/2}$) [16]. Решая (1), можно найти напряжение, которое установится через время τ_{on} после достижения V_{th}^0 :

$$V_{th} = I_p R_{off} - (I_p R_{off} - V_{th}^0) \exp \left(-\frac{\tau_{on}}{R_{off} C} \right). \quad (3)$$

Подставив $C \sim F^{-1}$ и $\tau_{on} \sim F^{1/2}$, с учетом поправочного коэффициента δ_{th} получим уравнение

$$V_{th} = \delta_{th} I_p R_{off} - (\delta_{th} I_p R_{off} - V_{th}^0) \exp(-A F^{1/2}). \quad (4)$$

При $A = 1.46 \cdot 10^{-3} \text{ Hz}^{-1/2}$, $\delta_{th} = 0.47$ формула (4) хорошо аппроксимирует модельные данные (рис. 2, а). Коэффициент δ_{th} можно интерпретировать как температурный коэффициент изменения R_{off} в ходе неравновесного нагрева до переключения. Зависимость V_h от частоты F имеет сложный характер и достигает минимума при $F \approx 274$ kHz. Время запаздывания выключения τ_{off} связано с запаздыванием остывания канала. Поэтому аналогично можно написать формулы для V_h :

$$V_h = I_p R_{on} - (I_p R_{on} - V_h^0) \exp \left(-\frac{\tau_{off}}{R_{on} C} \right), \quad (5)$$

$$V_h = \delta_h I_p R_{on} - (\delta_h I_p R_{on} - V_h^0) \exp(-B F^{1/2}). \quad (6)$$

При $B = 0.01 \text{ Hz}^{-1/2}$, $\delta_h = 4.26$ формула (6) хорошо аппроксимирует модельные данные в широком диапазоне

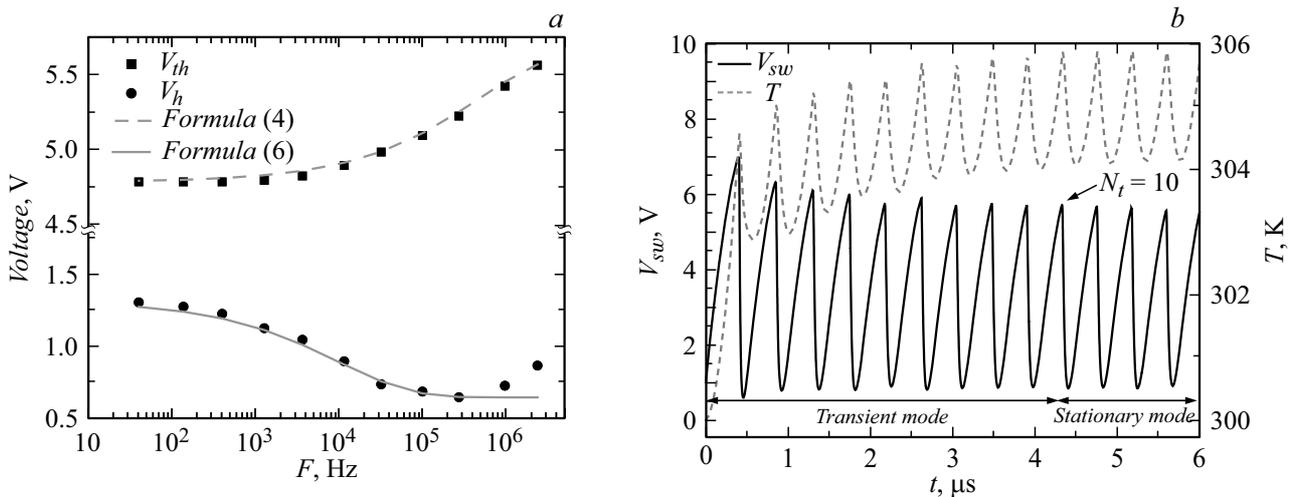


Рис. 2. *a* — модельная зависимость V_{th} и V_h (символы) от частоты F и аппроксимирующие кривые с использованием формул (4) и (6); *b* — осциллограммы напряжения на переключателе V_{sw} и температуры T на краю VO_2 -канала, на которых наблюдаются переходный и стационарный режимы.

частот (рис. 2, *a*). Коэффициент δ_h можно интерпретировать как температурный коэффициент изменения R_{on} в ходе остывания канала до обратного переключения. Отклонение от формулы (6) и увеличение V_h при высоких частотах ($F > 274$ kHz) связаны с эффектом увеличения R_{on} (см. формулу (5)). Модель показывает, что в процессе высокочастотных осцилляций область канала перестает полностью переходить в металлическое состояние и R_{on} начинает возрастать.

При уменьшении емкости C ниже 80 pF контур перестает осциллировать спустя 1–2 колебания, но при этом переключатель остается во включенном состоянии. Это объясняется тем, что создается такое распределение температуры в канале, соответствующее более высокому R_{on} , что нагрузочная кривая, задаваемая током I_p , перестает находиться в области отрицательного дифференциального сопротивления и пересекает ВАХ на низкоомной ветви, создавая устойчивое состояние схемы.

В работе контура можно наблюдать два режима работы: переходный (длительностью N_t осцилляций), который начинается сразу после включения, и стационарный. В переходном режиме значения V_{th} и V_h изменяются от цикла к циклу, а в стационарном выходят на постоянные величины. На рис. 2, *b* представлены осциллограмма напряжения на переключателе V_{sw} ($F \approx 2.4$ MHz), демонстрирующая переходный ($N_t = 10$) и стационарный режимы, а также соответствующий график изменения температуры T на краю VO_2 -канала. Причиной начального падения V_{th} служит возрастание эффективной окружающей температуры переключателя за счет прогрева подложки, что видно по температурной осциллограмме. Разогрев подложки равносителен уменьшению величины R_{off} от максимального до некоторого стационарного значения, что по формуле (3) приводит к снижению

V_{th} . Из-за уменьшения V_{th} уменьшается запасаемая в конденсаторе C энергия, которая тратится на разогрев канала во время разрядки. Это приводит к уменьшению максимальной температуры в центре канала, сужению области металлического состояния и возрастанию R_{on} , что ведет к увеличению V_h в соответствии с формулой (5).

Число периодов N_t , за которое происходит выход на стационарный режим, можно выразить как отношение времени прогрева подложки ($\sim 1/V_p$) к периоду колебаний ($1/F$), поэтому с учетом модельных данных оценка N_t выглядит как

$$N_t = \left[6 \cdot 10^{-3} F^{1/2} \right]. \quad (7)$$

Так, при высоких частотах ($F \approx 2.4$ MHz) переход в стационарный режим работы наблюдается за $N_t = 10$ осцилляций (рис. 3, *a*), а при малых частотах ($F \leq 3.6$ kHz) стационарный режим устанавливается в течение первого периода ($N_t = 1$).

Значение отклонения частоты, оцениваемой по формуле (2), $F_{eq}^0 = F_{eq}(V_{th}^0, V_h^0)$ относительно частоты F модельного расчета может быть оценено как

$$E_F = \frac{F_{eq}^0 - F}{F} \cdot 100\%. \quad (8)$$

На рис. 3, *b* представлена зависимость $E_F(F)$. Можно отметить, что с ростом частоты ошибка значительно увеличивается и для частот $F \approx 2.4$ MHz составляет $E_F \approx 114\%$. Относительное отклонение при определении амплитуды осцилляций $A^0 = V_{th}^0 - V_h^0$ относительно амплитуды $A = V_{th} - V_h$ модельных осциллограмм выражается формулой

$$E_A = \frac{A^0 - A}{A} \cdot 100\%. \quad (9)$$

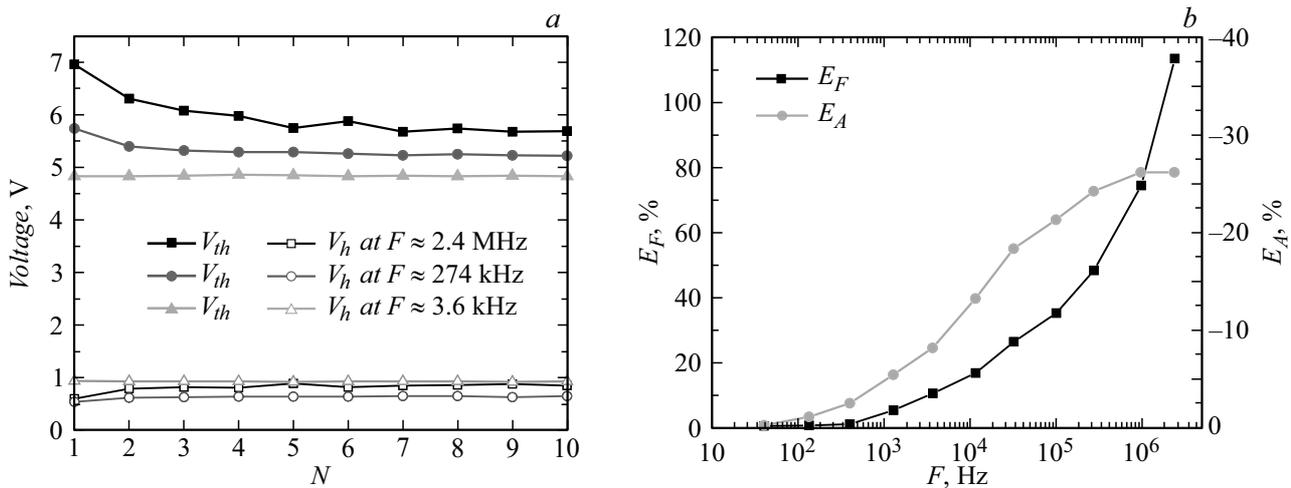


Рис. 3. Зависимость пороговых напряжений V_{th} и V_h от номера осцилляций N при различных частотах F во время переходного режима (a) и зависимости функции ошибок E_F и E_A от частоты F (b).

Из рис. 3, b видно, что величина E_A всегда отрицательна, т. е. без учета динамических эффектов мы получаем заниженные значения амплитуды, и с ростом частоты $E_A(F)$ возрастает по модулю и достигает значений -26% . На высоких частотах имеется тенденция к насыщению $E_A(F)$, связанная с одновременным ростом V_{th} и V_h . Следует отметить, что функции E_F и E_A приведены для модельного переключателя и могут отличаться при изменении геометрии канала, материала подложки или электрических свойств пленки диоксида ванадия, тем не менее зависимости будут качественно повторяться.

Результаты численного моделирования позволили выявить эффект изменения динамических пороговых характеристик VO_2 -переключателя в зависимости от частоты осцилляций автоколебательного контура. Обнаружен переходный режим осцилляций, связанный с саморазогревом подложки, который появляется в килогерцевом диапазоне и может влиять на время установления синхронизации. Предложены аналитические формулы, позволяющие оценивать частотные зависимости динамических пороговых характеристик. Проведена оценка возникающих отклонений при определении частоты и амплитуды сигнала без учета обнаруженных эффектов. Выявленные закономерности имеют практическую значимость при конструировании осцилляторных нейронных сетей на VO_2 -переключателях с ФПМП.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00135).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Vodicarevic D., Locatelli N., Grollier J., Querlioz D. // J. Appl. Phys. 2018. V. 124. P. 152117.
- [2] Novikov A., Benderskaya E. Networks of coupled oscillators for cluster analysis: overview and application prospects // 13th Int. Symp. on neural networks. St. Petersburg, 2016. P. 444–453.
- [3] Kumar A., Mohanty P. // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 411.
- [4] Strogatz S.H. // Physica D. 2000. V. 143. P. 1–20.
- [5] Nikonov D.E., Csaba G., Porod W., Shibata T., Voils D., Hammerstrom D., Young I.A., Bourianoff G.I. // IEEE J. Explor. Solid-State Comput. Devices Circuits. 2015. V. 1. P. 85–93.
- [6] Hölzel R.W., Krischer K. // New J. Phys. 2011. V. 13. P. 73031.
- [7] Raychowdhury A., Parihar A., Smith G.H., Narayanan V., Csaba G., Jerry M., Porod W., Datta S. // Proc. IEEE. 2018. V. 107. P. 73–89.
- [8] Sharma A.A., Bain J.A., Weldon J.A. // IEEE J. Explor. Solid-State Comput. Devices Circuits. 2015. V. 1. P. 58–66.
- [9] Pergament A., Velichko A., Belyaev M., Putrolaynen V. // Physica B. 2018. V. 536. P. 239–248.
- [10] Velichko A., Belyaev M., Putrolaynen V., Boriskov P. // Electronics. 2018. V. 7. P. 266.
- [11] Xue W., Liu G., Zhong Z., Dai Y., Shang J., Liu Y., Yang H., Yi X., Tan H., Pan L., Gao S., Ding J., Xu X.-H., Li R.-W. // Adv. Mater. 2017. V. 29. P. 1702162.
- [12] Ильинский А.В., Квашенкина О.Е., Шадрин Е.Б. // ФТП. 2012. Т. 46. В. 9. С. 1194–1208.
- [13] Radu I.P., Govoreanu B., Mertens S., Shi X., Cantoro M., Schaekers M., Jurczak M., De Gendt S., Stesmans A., Kittl J.A., Heyns M., Martens K. // Nanotechnology. 2015. V. 26. P. 165202.
- [14] Velichko A., Belyaev M., Putrolaynen V., Pergament A., Perminov V. // Int. J. Mod. Phys. B. 2017. V. 31. P. 1650261.
- [15] Беляев М.А., Путролайнен В.В., Величко А.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 24. С. 41–48.
- [16] Marín E., Vaca-Oyola L.S., Delgado-Vasallo O. // Rev. Mex. Física E. 2016. V. 62. P. 1–4.