

**Схемотехническое моделирование мемристивных выпрямителей****Е. Б. Соловьева<sup>✉</sup>, В. А. Смирнов**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия<sup>✉</sup> selenab1@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрено компьютерное моделирование однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей на базе мемристоров в системе LTspice. Мемристоры описываются биполярной пороговой моделью. В качестве модели мемристоров использована биполярная пороговая модель, которая позволяет ограничивать напряжение элемента и управлять его сопротивлением. Применяются безмостовая и мостовая принципиальные схемы выпрямителей, разные типы нагрузок (высокоомное сопротивление, повторитель и усилитель напряжения). В процессе анализа цепей и расчета передаточных характеристик показано влияние нагрузки на точность выпрямления. В результате моделирования мемристивных выпрямителей получена высокая точность преобразований.

**Ключевые слова:** схемотехническое моделирование, мемристор, модель, выпрямитель, мемристивное устройство

**Для цитирования:** Соловьева Е. Б., Смирнов В. А. Схемотехническое моделирование мемристивных выпрямителей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 2. С. 99–106. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-2-99-106.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

**Circuit Simulation of Memristive Rectifiers****E. B. Solovyeva<sup>✉</sup>, V. A. Smirnov**

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>✉</sup> selenab1@yandex.ru

**Abstract.** The computer simulation of half-wave and full-wave rectifiers based on memristors in the LTspice simulator is represented. Memristors are described by bipolar memristive system with a threshold. A bipolar threshold model is used as a memristor model, which allows limiting the element voltage and controlling its resistance. Bridgeless and bridge circuits with different types of loads (high resistance, voltage repeater, and voltage amplifier) are used. The analysis of circuits and the calculation of transfer characteristics exhibit the influence of load on the rectification accuracy. The simulation of memristive rectifiers results in reaching high accuracy.

**Keywords:** circuit simulation, memristor, model, rectifier, memristive device

**For citation:** Solovyeva E. B., Smirnov V. A. Circuit Simulation of Memristive Rectifiers // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 2. P. 99–106. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-2-99-106.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Выпрямление сигнала – нелинейное преобразование переменного сигнала (alternating current, AC) в пульсирующий однонаправлен-

ный сигнал, которое выполняется во многих технических системах. Выпрямители со сглаживанием пульсаций, например с помощью конденсато-

ра, формируют постоянный сигнал (direct current, DC). Такие выпрямители широко применяются для проектирования блоков питания, зарядных устройств, нелинейных преобразователей в электротехнике, радиотехнике, робототехнике, системах связи, управления и т. д. [1]–[5].

Выпрямители классифицируются [3], [4]:

- по количеству содержащих в выходном сигнале полупериодов исходного сигнала (одно- и двухполупериодные выпрямители);
- по количеству фаз генератора при проектировании многофазных систем (в основном одно- и трехфазные выпрямители);
- по типу элементов или их соединений, выполняющих нелинейное преобразование (диоды, диодные мосты, тиристоры и т. д.);
- по отношению к электрической энергии (активные и пассивные выпрямители).

В последние годы многие нелинейные преобразователи строятся на базе пассивных нанозаполнителей – мемристоров. Этот элемент весьма перспективен в силу своих достоинств: высокой скорости переключения, масштабируемости, миниатюризации, энергоэффективности, энергонезависимости, совместимости с КМОП-технологиями и т. п. [6]–[9]. Мемристор обладает широким спектром применения: энергонезависимые запоминающие устройства (RRAM), цифровые и логические схемы, нейроморфные системы, сенсоры, нейронные сети в системах искусственного интеллекта, разнообразные нелинейные преобразователи (осцилляторы, корректоры, фильтры, в том числе и выпрямители) [9]–[11]. Устройства, построенные на основе мемристоров, приобретают указанные достоинства этого элемента.

Рассмотрим моделирование однополупериодных и двухполупериодных мемристорных выпрямителей при разных входных сигналах и типах нагрузки в системе LTspice.

**Моделирование однополупериодного мемристорного выпрямителя.** Схема однополупериодного выпрямителя на базе мемристора, построен-

ная в системе LTspice, показана на рис. 1. Схема имеет следующие параметры:  $R_1 = 555 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 10 \text{ кОм}$ ,  $U_1$  – мемристор с биполярной пороговой моделью,  $U_2$  – операционный усилитель серии LT1008,  $V_1 = 15 \text{ В}$  и  $V_2 = -15 \text{ В}$  – источники постоянного напряжения,  $u(t) = 3 \sin(\pi t)$  – входное напряжение. На рис. 1 обозначения  $N$  и  $P$  – отрицательный и положительный выводы мемристора;  $VCCP$ ,  $VCCN$  – узлы подключения источников питания для операционного усилителя (ОУ);  $OUT$  – узел выходного напряжения цепи. Нагрузкой выпрямителя служит резистор  $R_1$  с невысоким сопротивлением (до 1 кОм). Малое значение нагрузки необходимо для избегания режима насыщения мемристора. Действительно, при высоком импедансе нагрузки отрицательное напряжение смещения мемристора попадает в диапазон, при котором переход мемристора из состояния ON в состояние OFF невозможен. При заданной нагрузке  $R_1$  амплитуда выпрямленного напряжения уменьшается в 10 раз. Для его увеличения на выходе схемы подключается усилительный каскад с ОУ LT1008 (безынерционное звено с коэффициентом усиления 10).

Анализ цепи выполнен с биполярной пороговой моделью мемристора (BMST – bipolar memristive system with a threshold), которая описывается уравнениями [12]

$$\begin{cases} i = x^{-1}u, \\ \frac{dx}{dt} = f(u)w(x,u); \end{cases}$$

$$f(u) = \beta u + \frac{1}{2}(\alpha - \beta)(|u + U_t| - |u - U_t|);$$

$$w(x,u) = \delta_1(u)\delta_1(R_{\text{off}} - x) + \delta_1(-u)\delta_1(x - R_{\text{on}}),$$

где  $i$ ,  $u$ ,  $x$  – ток, напряжение и переменная состояния (мемристанс) мемристора соответственно;  $f(u)$  – нелинейная функция с пороговыми свойствами;  $\beta$  – коэффициент наклона при  $|u| > U_t$ ;

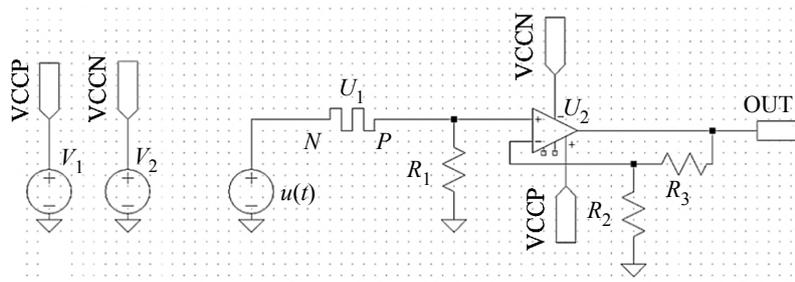


Рис. 1. Схема мемристорного выпрямителя с выходным усилительным каскадом  
Fig. 1. Memristive rectifier circuit with output amplifier

$\alpha$  – коэффициент наклона при  $|u| < U_t$ ;  $U_t$  – пороговое значение напряжения;  $w(x, u)$  – оконная функция, ограничивающая мемристанс (сопротивление мемристора) минимальным  $R_{on}$  и максимальным  $R_{off}$  значениями;  $\delta_1(u)$  – единичная ступенчатая функция. В BMST-модели заданы следующие параметры:  $R_{on} = 5$  кОм,  $R_{off} = 1$  МОм,  $U_t = 0.01$  В,  $\alpha = 0$ ,  $\beta \approx 2 \cdot 10^9$ .

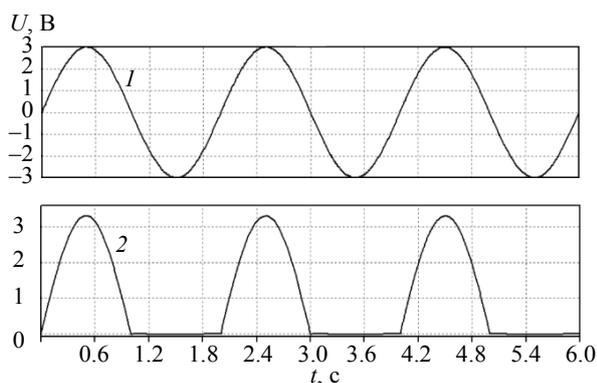


Рис. 2. Входной сигнал (кривая 1) цепи и результат (кривая 2) его выпрямления  
 Fig. 2. Input signal (curve 1) and rectification result (curve 2)

На рис. 2 показаны входной  $u(t)$  и выходной  $u_{out}(t)$  сигналы выпрямителя, схема которого изображена на рис. 1. Из рис. 2 видно, что рассмотренная мемристивная цепь точно выполняет выпрямление гармонического входного сигнала  $u(t) = 3 \sin(\pi t)$ .

Известно, что однополупериодные выпрямители эффективны на высоких частотах, например в импульсных блоках питания. Рассмотрим этот факт подробнее. На практике после выпрямления сигнала осуществляется его детектирование, т. е. сглаживание пульсаций (удаление всех колебаний кроме постоянной составляющей). Эту операцию выполняет фильтр нижних частот, например простейший С-фильтр, включаемый параллельно нагрузке. Исходя из решения дифференциального уравнения первого порядка, напряжение на нагрузке описывается затухающей экспонентой, показатель которой содержит постоянную времени  $\tau$  [1]. Для детектирования сигнала следует соблюдать условие: период фильтруемого сигнала должен быть меньше  $\tau$  для эффективной работы фильтра нижних частот. Таким образом, частоты выпрямляемого сигнала рекомендуется выбирать высокими, ориентируясь на постоянную времени  $\tau$ .

**Моделирование двухполупериодного выпрямителя с двумя мемристорами при разных нагрузках.** Для выпрямления сигналов на низких частотах, например сетевого напряжения, реко-

мендуется применять двухполупериодный выпрямитель. Простая структура такого выпрямителя показана на рис. 3. Одна ветвь цепи – мемристор  $M_1$ , пропускает положительный полупериод входного сигнала. Параллельная ветвь – последовательное соединение умножителя напряжения (безынерционного звена с коэффициентом  $(-1)$ ) и мемристора  $M_2$ , пропускает отрицательный полупериод. Один мемристор находится в высокоимпедансном состоянии, другой – в низкоимпедансном. Начальные положения мемристоров:  $M_1$  – в состоянии ON,  $M_2$  – в состоянии OFF. Мемристоры описываются BMST-моделью (аналогично описанию однополупериодного выпрямителя) с параметрами:  $R_{on} = 5$  кОм,  $R_{off} = 1$  МОм,  $U_t = 0.01$  В,  $\alpha = 0$ . Параметр  $\beta$  менялся в зависимости от типа входного сигнала. На рис. 3 нагрузка цепи обозначена резистором  $R$ .

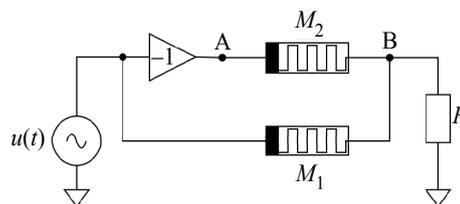


Рис. 3. Структурная схема двухполупериодного выпрямителя на мемристорах

Fig. 3. Structural diagram of a full-wave memristive rectifier

Двухполупериодный выпрямитель рассматриваемой структуры может работать при низкой и высокой нагрузках. Проиллюстрируем этот факт анализом схемы на рис. 3. Запишем уравнение закона токов для узла В (потенциал в узле А равен  $u_A(t) = -u(t)$ ):

$$\frac{u_B(t) - u(t)}{M_1} + \frac{u_B(t) + u(t)}{M_2} = \frac{u_B(t)}{R}, \quad (1)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – мемристансы (сопротивления мемристоров),  $u_B(t)$  – потенциал в узле В. Из выражения (1) получим связь между входным и выходным напряжениями выпрямителя:

$$u_B(t) = u(t) \frac{1/M_1 - 1/M_2}{1/M_1 + 1/M_2 - 1/R}. \quad (2)$$

В предельных случаях, с учетом того, что одновременно один из мемристансов равен  $R_{on}$ , а другой –  $R_{off}$  и  $R_{on} \ll R_{off}$ , равенство (2) преобразуем в приближенное выражение:

$$u_B \approx u \frac{\pm 1/R_{on}}{1/R_{on} - 1/R}. \quad (3)$$

Как следует из (3), влияние  $R$  на передаточную характеристику выпрямителя (множитель при  $u$  в правой части формулы) уменьшается с увеличением  $R$ . Кроме того, для минимизации влияния  $R$  следует соблюдать соотношение:  $R \gg R_{\text{он}}$ .

Далее рассмотрим реализацию структуры, показанной на рис. 3, в виде принципиальных схем двухполупериодного выпрямителя с разными нагрузками.

**Нагрузка в виде высокоомного сопротивления.** На рис. 4 изображена схема двухполупериодного выпрямителя с высокоомной нагрузкой ( $R_3 = 10 \text{ МОм}$ ,  $R_3 \gg R_{\text{он}}$ ). Параметры схемы следующие:  $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$  (резисторы, определяющие коэффициент усиления ОУ),  $U_1$  – ОУ серии LT1008,  $U_2$  и  $U_3$  – мемристоры с моделью BMST. Источники постоянного напряжения  $V_1 = 15 \text{ В}$  и  $V_2 = -15 \text{ В}$  задают разнополярное питание для ОУ. На основе ОУ с резисторами в прямой и обратной связях построен умножитель с коэффициентом  $(-1)$ . Источник напряжения  $V_3$  задает входной сигнал цепи.

В качестве входного сигнала применяется гармонический сигнал и последовательность треугольных импульсов. Это – гладкие сигналы с более узким спектром (без высокочастотных составляющих) по сравнению с крутыми сигналами. Выпрямители более качественно работают с гладкими сигналами, не порождая существенного высокочастотного шума.

На рис. 5 показаны примеры входных  $u(t)$  и выходных  $u_{\text{out}}(t)$  сигналов выпрямителя, схема которого изображена на рис. 4. Рис. 5, а получен при параметре  $\beta = 1.056 \cdot 10^{15}$  в BMST-модели; рис. 5, б – при  $\beta = 0.415 \cdot 10^{15}$ .

Как следует из рис. 5, получено качественное выпрямление входных сигналов.

**Нагрузка в виде повторителя и усилителя напряжения.** В качестве нагрузки удобно применять повторитель напряжения и усилительный каскад, построенные на ОУ, с целью снижения влияния нагрузки на характеристику выпрямителя, а также увеличения амплитудного диапазона выпрямленного сигнала. Как отмечалось ранее,

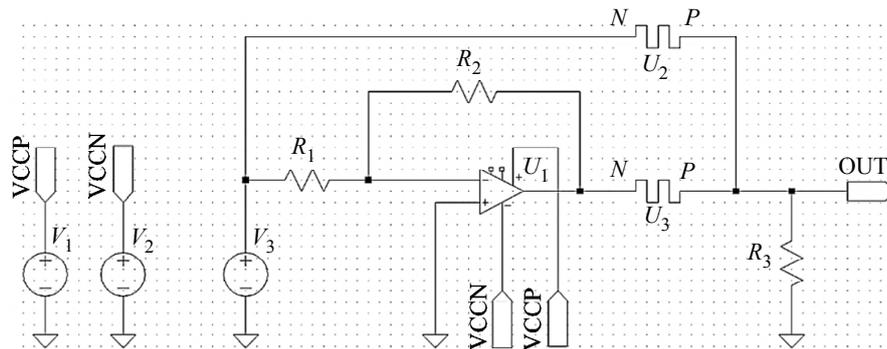


Рис. 4. Схема двухполупериодного выпрямителя с нагрузкой в виде высокоомного сопротивления  $R_3$

Fig. 4. Full-wave rectifier with load in the form of high resistance  $R_3$

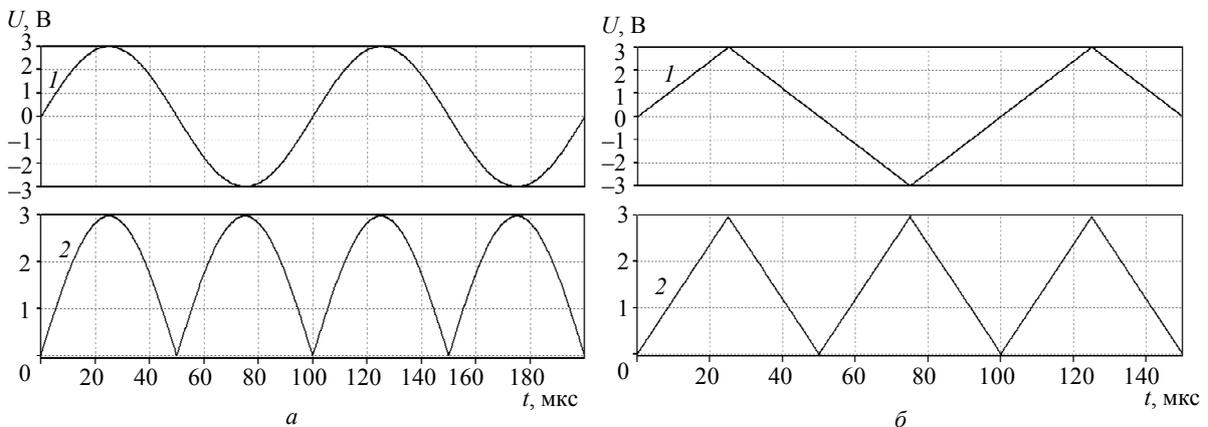


Рис. 5. Входной (кривая 1) и выходной (кривая 2) сигналы выпрямителя на рис. 4: а – при гармоническом воздействии; б – при последовательности треугольных импульсов

Fig. 5. Input (curve 1) and output (curve 2) signals of the rectifier in fig. 4: а – under harmonic excitation; б – under triangular pulse sequence

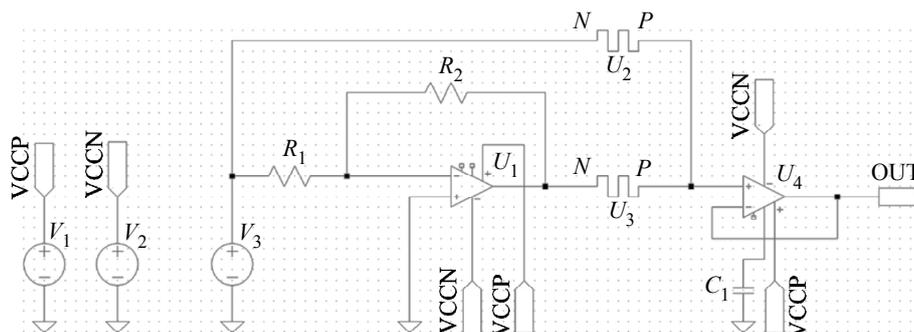


Рис. 6. Схема двухполупериодного выпрямителя с нагрузкой в виде повторителя напряжения

Fig. 6. Full-wave rectifier with load in the form of voltage repeater

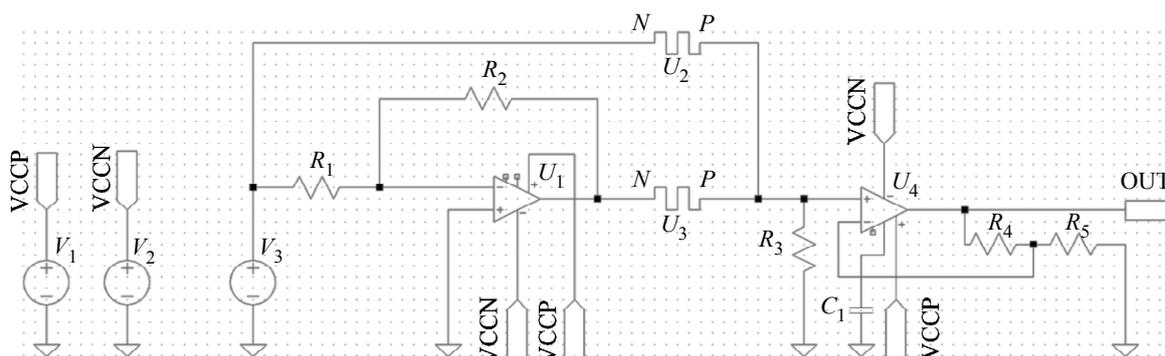


Рис. 7. Схема двухполупериодного выпрямителя с нагрузкой, включающей резистор  $R_3$  и усилительное звено

Fig. 7. Full-wave rectifier with load including resistor  $R_3$  and amplification unit

для удаления высокочастотного шума из выходного сигнала выпрямителя используется фильтр нижних частот (например С-фильтр).

На рис. 6 и 7 представлены схемы выпрямителей с нагрузкой, соответственно, в виде повторителя напряжения ( $U_4$  – ОУ серии LT1008 с емкостной коррекцией  $C_1 = 50$  пФ), а также в виде параллельного соединения резистора  $R_3 = 500$  Ом (понижающего амплитуду выпрямленного сигнала в 10 раз) и усилительного звена с коэффициентом 10 ( $U_4$  – ОУ серии LT1008 с корректирующей емкостью  $C_1 = 50$  пФ, резисторами  $R_4 = 10$  кОм и  $R_5 = 1$  кОм). Остальные параметры указанных схем такие же, как на рис. 4. Для обеих схем параметр  $\beta = 1.056 \cdot 10^{15}$  в BMST-модели мемристора при гармоническом воздействии,  $\beta = 1.658 \cdot 10^{15}$  – при последовательности треугольных импульсов.

Результаты моделирования выпрямителей со схемами на рис. 6 и 7 при входном гармоническом сигнале и при последовательности треугольных импульсов такие же, как на рис. 5.

**Моделирование двухполупериодного выпрямителя со схемой мемристорного моста.** Двухполупериодный выпрямитель можно по-

строить на мостовом соединении. Такое соединение с четырьмя диодами называется диодным мостом Гретца (Graetz bridge) или выпрямителем Гретца (Graetz rectifier) [13]. Схема моста Гретца изображена на рис. 8, а. Достоинство мостового соединения – отсутствие двухполярного воздействия, которое сформировано на рис. 3, тем самым схема выпрямителя упрощается и габариты устройства уменьшаются. Нагрузка  $R$  на рис. 8, а подключается последовательно с диодами  $D_1$  и  $D_4$  при положительном воздействии и с диодами  $D_2$  и  $D_3$  при отрицательном воздействии. Таким образом, при каждой полярности входного напряжения нагрузка последовательно соединена с двумя диодами. В результате потери напряжения на  $p$ – $n$ -переходах увеличиваются в два раза (КПД снижается) по сравнению с соединением нагрузки с одним проводящим элементом при немостовом соединении (рис. 3). В итоге мостовую схему целесообразно применять, когда выпрямляемое напряжение на нагрузке  $R$  на порядки больше падения напряжения на открытом  $p$ – $n$ -переходе, а токи нагрузки относительно невелики.

На рис. 8, б представлена схема мемристивного моста, полученная заменой диодов на мемристоры в мосте Гретца. В этой схеме при положительном входном напряжении мемристоры  $M_1$  и  $M_4$  находятся в низкоомном состоянии,  $M_2$  и  $M_3$  – в высокоомном состоянии. При отрицательном входном напряжении состояния мемристоров меняются на противоположные. В предельных низкоомном и высокоомном состояниях мемристансы равны  $R_{on}$  и  $R_{off}$  соответственно.

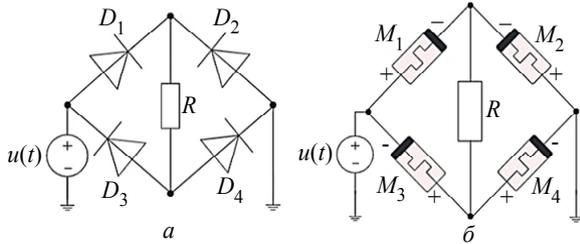


Рис. 8. Схема двухполупериодного мостового выпрямителя: а – диодный мост Гретца; б – мемристивный мост

Fig. 8. Full-wave bridge rectifier: а – Graetz bridge; б – memristive bridge

Оценим влияние нагрузки на передаточную характеристику мемристивного выпрямителя. Выходной сигнал цепи на рис. 8, б – напряжение на нагрузке  $R$ . Выполним анализ цепи с учетом однотипности мемристоров (BMST-моделей) и следующем равенстве их мемристансов:  $M_1 = M_4$ ,  $M_2 = M_3$ . При положительном входном напряжении в предельном случае, когда  $M_1 = M_4 = R_{on}$ ,  $M_2 = M_3 = R_{off}$ ,  $R_{on} \ll R_{off}$ , запишем

$$u_R(t) = u(t) \frac{R}{M_1 + R + M_4} = u(t) \frac{R}{2M_1 + R} = u(t) \frac{R}{2R_{on} + R}. \quad (4)$$

При отрицательном входном напряжении в предельном случае, когда  $M_1 = M_4 = R_{off}$ ,  $M_2 = M_3 = R_{on}$ , получим

$$u_R(t) = -u(t) \frac{R}{M_2 + R + M_3} = -u(t) \frac{R}{2M_2 + R} = -u(t) \frac{R}{2R_{on} + R}. \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) следует, что мостовую мемристивную схему целесообразно применять при  $R \gg 2R_{on}$ .

Выполним моделирование мостового мемристивного выпрямителя в системе LTspice. Схема цепи показана на рис. 9. Здесь  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$ ,  $U_4$  –

мемристоры, описываемые BMST-моделью с параметром  $\beta = 1.056 \cdot 10^{15}$ . Нагрузка – резистор  $R_1 = 500$  кОм. Входной гармонический сигнал  $u_1(t)$  – напряжение с амплитудой 3 В и частотой 10 кГц. На рис. 10 представлен выходной сигнал  $u_{R_1}(t)$  – напряжение на нагрузке.

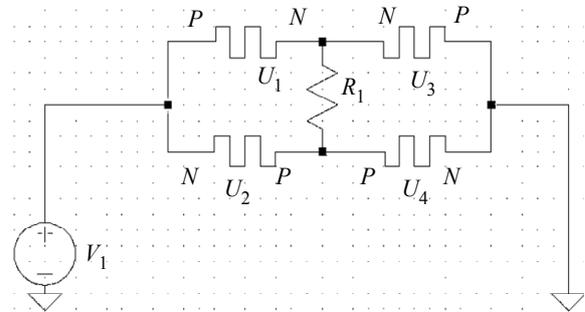


Рис. 9. Схема мостового мемристивного выпрямителя в системе LTspice

Fig. 9. Memristive bridge rectifier in LTspice

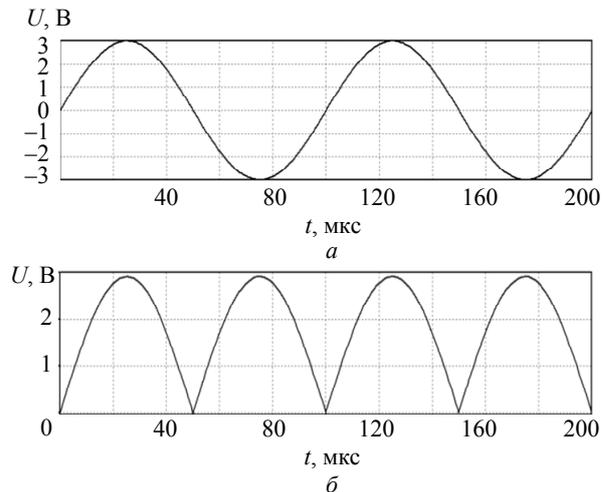


Рис. 10. а – входной сигнал на источнике напряжения и б – выходное напряжение на нагрузке  
Fig. 10. а – input signal of voltage source and б – output voltage of load

Как следует из рис. 10, получено качественное выпрямление гармонического сигнала.

**Заключение.** Рассмотрено несколько вариантов схемотехнического моделирования однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей на базе мемристоров в системе LTspice. В качестве модели мемристоров использована биполярная пороговая модель, которая позволяет ограничивать напряжение элемента и управлять его сопротивлением. Достоинство BMST-модели – ее нечувствительность к начальному состоянию мемристанса. В результате схемотехнического моделирования показано, что мемристивные выпрямители обеспечивают высокую точность преобразований.

### Список литературы

1. Horowitz P., Hill W. The art of electronics. 3<sup>rd</sup> ed. NY: Cambridge University Press, 2015. 1219 p.
2. Deng Q. Progress and application of single-phase multi-level rectifiers // Highlights in Sci., Engin. and Technol. 2024. Vol. 112. P. 187–195. doi: 10.54097/nhh8y734.
3. PWM Regenerative rectifiers: State of the art / J. R. Rodriguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, P. Pontt, P. Lezana // IEEE Trans. on Industrial Electron. 2005. Vol. 52, no. 1. P. 5–22. doi: 10.1109/TIE.2004.841149.
4. Mahobia S. K., Kumrey G. R. Study and performance of single-phase rectifiers with various type of parameter // Int. J. of Engin. Technol. and Management Research. 2016. Vol. 3, no. 1. P. 9–14. doi: 10.29121/ijetmr.v3.i1.2016.39.
5. Соловьева Е. Б., Езеров К. С., Иншаков Ю. М. Выпрямление и детектирование сигналов в NI ELVIS комплексе // Качество. Инновации. Образование. 2021. № 4(174). С. 63–71. doi: 10.31145/1999-513x-2021-4-63-71.
6. Im I. H., Kim S. J., Jang H. W. Memristive devices for new computing paradigms // Advanced Intelligent Syst. 2020. Vol. 2, no. 11. P. 2000105. doi: 10.1002/aisy.202000105.
7. The growing memristor industry / M. Lanza, S. Pazos, F. Aguirre, A. Sebastian, M. Le Gallo, S. M. Alam, S. Ikegawa, J. J. Yang, E. Vianello, M.-F. Chang, G. Molas, I. Naveh, D. Ielmini, M. Liu, J. B. Roldan // Nature. 2025. Vol. 640. P. 613–622. doi: 10.1038/s41586-025-08733-5.
8. Solovyeva E. B., Azarov V. A. Comparative analysis of memristor models with a window function described in LTspice // 2021 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electron. Engin. (ElConRus). Moscow, St. Petersburg, Russia: IEEE, 2021. P. 1097–1101. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396217.
9. A review of memristor: material and structure design, device performance, applications and prospects / Y. Xiao, B. Jiang, Z. Zhang, Sh. Ke, Y. Jin, X. Wen, C. Ye // Sci. and Technol. of Advanced Materials. 2023. Vol. 24, no. 1. P. 2162323. doi: 10.1080/14686996.2022.2162323.
10. Nonlinearity in memristors for neuromorphic dynamic systems / K. Yang, J. J. Yang, R. Huang, Y. Yang // Small Sci. 2021. Vol. 2, no. 1. P. 2100049. doi: 10.1002/smsc.202100049.
11. Solovyeva E., Schulze S., Harchuk H. Behavioral modeling of memristor-based rectifier bridge // Appl. Sci. 2021. Vol. 11, no. 7. P. 2908. doi: 10.3390/app11072908.
12. Pershin Y. V., Ventra M. D. SPICE Model of memristive devices with threshold // Radioengin. 2013. Vol. 22, no. 2. P. 485–489.
13. Alexander Ch. K., Sadiku M. N. O. Fundamentals of electric circuits. NY: McGraw-Hill Education, 2021. 7<sup>th</sup> ed. 984 p.

### Информация об авторах

**Соловьева Елена Борисовна** – д-р техн. наук, зав. кафедрой теоретических основ электротехники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», почетный работник сферы образования РФ.

E-mail: selenabl@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8204-6632>

**Смирнов Владислав Александрович** – студент гр. 1409 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vladsmirn289@gmail.com

### References

1. Horowitz P., Hill W. The art of electronics. 3<sup>rd</sup> ed. NY: Cambridge University Press, 2015. 1219 p.
2. Deng Q. Progress and Application of single-phase multi-level rectifiers // Highlights in Sci., Engin. and Technol. 2024. Vol. 112. P. 187–195. doi: 10.54097/nhh8y734.
3. PWM regenerative rectifiers: State of the art / J. R. Rodriguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, P. Pontt, P. Lezana // IEEE Trans. on Industrial Electron. 2005. Vol. 52, no. 1. P. 5–22. doi: 10.1109/TIE.2004.841149.
4. Mahobia S. K., Kumrey G. R. Study and performance of single-phase rectifiers with various type of parameter // Int. J. of Engin. Technol. and Management Research. 2016. Vol. 3, no. 1. P. 9–14. doi: 10.29121/ijetmr.v3.i1.2016.39.
5. Solov'eva E. B., Ezerov K. S., Inshakov Ju. M. Vypryamlenie i detektirovanie signalov v NI ELVIS komplekse // Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie. 2021. № 4(174). S. 63–71. doi: 10.31145/1999-513x-2021-4-63-71. (In Russ.).
6. Im I. H., Kim S. J., Jang H. W. Memristive devices for new computing paradigms // Advanced Intelligent Syst. 2020. Vol. 2, no. 11. P. 2000105. doi: 10.1002/aisy.202000105.
7. The growing memristor industry / M. Lanza, S. Pazos, F. Aguirre, A. Sebastian, M. Le Gallo, S. M. Alam, S. Ikegawa, J. J. Yang, E. Vianello, M.-F. Chang, G. Molas, I. Naveh, D. Ielmini, M. Liu, J. B. Roldan // Nature. 2025. Vol. 640. P. 613–622. doi: 10.1038/s41586-025-08733-5.
8. Solovyeva E. B., Azarov V. A. Comparative analysis of memristor models with a window function described in LTspice // 2021 IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electr. and Electron. Engin. (ElConRus). Moscow, St. Petersburg, Russia: IEEE, 2021. P. 1097–1101. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396217.

9. A review of memristor: material and structure design, device performance, applications and prospects / Y. Xiao, B. Jiang, Z. Zhang, Sh. Ke, Y. Jin, X. Wen, C. Ye // Sci. and Technol. of Advanced Materials. 2023. Vol. 24, no. 1. P. 2162323. doi: 10.1080/14686996.2022.2162323.

10. Nonlinearity in memristors for neuromorphic dynamic systems / K. Yang, J. J. Yang, R. Huang, Y. Yang // Small Sci. 2021. Vol. 2, no. 1. P. 2100049. doi: 10.1002/smssc.202100049.

11. Solovyeva E., Schulze S., Harchuk H. Behavioral modeling of memristor-based rectifier bridge // Appl. Sci. 2021. Vol. 11, no. 7. P. 2908. doi: 10.3390/app11072908.

12. Pershin Y. V., Ventra M. D. SPICE Model of memristive devices with threshold // Radioengin. 2013. Vol. 22, no. 2. P. 485–489.

13. Alexander Ch. K., Sadiku M. N. O. Fundamentals of electric circuits. NY: McGraw-Hill Education, 2021. 7<sup>th</sup> ed. 984 p.

---

#### Information about the authors

**Elena B. Solovyeva** – Dr Sci. (Eng.), head of Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering Saint-Petersburg Electrotechnical University, Honorary Worker of the Education Sphere of the Russian Federation.

E-mail: selenab1@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8204-6632>

**Vladislav A. Smirnov** – student gr. 1409 of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vladsmirn289@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22.09.2025; принята к публикации после рецензирования 11.12.2025; опубликована онлайн 26.02.2026.

Submitted 22.09.2025; accepted 11.12.2025; published online 26.02.2026.

---