

УДК 621.316.722.1+519.876.5

А.А. Малаханов, А.Г. Малаханова, Ю.О. Васильева

## Разработка и верификация поведенческих моделей линейных стабилизаторов напряжения с защитой от короткого замыкания и перегрузки в рабочем цикле

Объектом разработки являются поведенческие модели линейного стабилизатора отрицательного напряжения в двух вариантах исполнения: с фиксированным значением выходного напряжения 5 В и с регулируемым выходным напряжением от значения опорного напряжения 1,25 до 14,5 В. В качестве прототипов моделей выбраны линейные стабилизаторы напряжения производства АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»: 5348EM035 (фиксированный вариант выходного напряжения) и 5348EP035 (регулируемый вариант выходного напряжения), а также их ближайший функциональный аналог UCC284DP производства «Texas Instruments». Стабилизаторы имеют защиту от короткого замыкания и перегрузки и относятся к группе стабилизаторов с низким падением напряжения. Поведенческие модели реализованы на языке SPICE и созданы преобразованием списков соединений схем замещения прототипов. Каждая схема замещения построена на базе функциональных схем интегральных микросхем стабилизаторов с учетом типовой схемы включения. Схемы замещения стабилизаторов реализованы на базе стандартных математических блоков, ограничителей, зависимых источников, управляемых ключей и пассивных элементов. Ограничения параметров прописаны внутри управляемых источников математическими соотношениями. В процессе верификации поведенческих моделей установлено соответствие результатов моделирования работы стабилизаторов в типовых схемах включения с заданными входными электрическими параметрами, указанными в технических описаниях производителей. Представлены результаты моделирования основных характеристик интегральных микросхем: входных и выходных напряжений, падения напряжения на стабилизаторе, временных диаграмм основных режимов работы интегральной микросхемы, включая режим защиты от короткого замыкания и перегрузки. Разработанные и верифицированные поведенческие модели линейных стабилизаторов напряжения 5348EM035 и 5348EP035, а также их функционального аналога UCC284DP будут полезны при разработке, проектировании и исследовании характеристик устройств электропитания радиоэлектронного и промышленного оборудования и применимы в современных специализированных САПР схемотехнического и имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** линейный стабилизатор напряжения, интегральная микросхема, поведенческая модель, OrCAD, SPICE, моделирование.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-2-103-108

Для организации надежных систем электропитания применяют стабилизаторы напряжения с требуемым качеством выходных напряжений и токов. Стабилизаторы напряжения могут строиться на базе линейных и импульсных схем. По сравнению с импульсными стабилизаторами [1, 2] линейные стабилизаторы не генерируют помехи во входной источник. Основным элементом современного стабилизатора напряжения является управляющая интегральная микросхема (ИМС), применение которой в реальном электронном устройстве требует оценки ее возможностей и предварительного компьютерного имитационного и схемотехнического моделирования, используя системы автоматизированного проектирования (САПР).

САПР схемотехнического и имитационного моделирования пользуются достаточно большой популярностью. Они позволяют анализировать работу аналоговых, цифровых и смешанных (аналого-цифровых) устройств, осуществлять синтез пассивных и активных фильтров, оптимизацию и др. [3–6]. Компьютерное моделирование ИМС на этапах разработки является дополнительной мерой для улучшения прогнозируемости поведения и исследования отдельных узлов устройства, а также в полной мере может послужить заменой физическому моделированию (макетированию), что положительно отразится

как на стоимости, так и надежности конечной разрабатываемой продукции [7].

Поведенческие модели (ПМ) [8–10] предназначены для описания функционала ИМС, имитируя ее работу с заданной точностью при установленных внешних воздействиях. Поведенческие модели, созданные на языке SPICE [11], могут быть использованы при анализе работы микросхем в режиме по постоянному току, во временной области, параметрическом анализе и т.д. Использование ПМ избавляет разработчика от необходимости синтезировать принципиальную схему ИМС, что снижает трудозатраты и уменьшает вероятность появления конструктивных ошибок при исследовании работы ИМС в типовой схеме включения и в составе более сложных приборов.

В работе представлен этап разработки поведенческих моделей линейных стабилизаторов 5348EM035 и 5348EP035 [12] и их ближайшего функционального аналога UCC284DP (в двух вариантах исполнения) [13]. 5348EM035 представляет собой стабилизатор с фиксированным отрицательным значением выходного напряжения 5 В; 5348EP035 – линейный стабилизатор с регулируемым отрицательным выходным напряжением от значения опорного напряжения ( $U_{оп}$ ) 1,25 до 14,5 В. Указанные стабилизаторы имеют функционал переключения для защиты от короткого замыкания (КЗ) и перегрузки.

Верификация полученных SPICE-моделей осуществляется путем сравнения основных статических и динамических электрических характеристик ИМС, указанных в технической документации к приборам, и результатов моделирования ПМ. Моделирование проводилось в программном комплексе Cadence OrCAD [4].

#### Описание процесса моделирования

Часть основных электрических параметров линейных стабилизаторов 5348EM035, 5348EP035 и их аналога UCC284DP, указанных в технических описаниях производителей [12, 13], представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Основные электрические параметры стабилизаторов 5348EM035 и 5348EP035 и их аналогов

Наименование параметра, единица измерения	Норма параметра при температуре окружающей среды $25 \pm 10$ °C
Опорное напряжение $U_{оп}$ , В	-1,25
Выходное напряжение $U_{вых}$ , В	-5 (фиксированное)
	-1,25 ÷ -14,5 (регулируемый вариант)
Максимальное напряжение питания $U_{пит}$ , В	-16
Ток потребления $I_{пот}$ , мА	20
Максимальная рассеиваемая мощность $P_{рас}$ , Вт	5
Минимальное падение напряжения $U_{пл\ min}$ , В	0,4

Алгоритм работы ИМС 5348EM035 и 5348EP035 и их аналогов характеризуется тем, что в рабочем режиме и режиме защиты от КЗ ИМС сама формирует нужное напряжение на выводе «выключение/управление» SD/CT в зависимости от режима работы. В табл. 2 представлены режимы работы микросхемы в соответствии с диапазонами напряжения на выводе SD/CT.

Таблица 2  
Режимы работы микросхем 5348EM035 и 5348EP035

Напряжение на выводе «Выключение/управление» SD/CT	Режим работы микросхемы
От +5 до -0,6 В	Режим низкого энергопотребления; выходной ключ закрыт
От -0,6 до -1,7 В	Рабочий режим
От -1,7 до -3,0 В	Режим защиты от короткого замыкания (КЗ); выходной ключ работает в квазиимпульсном режиме, открываясь на короткое время, до снятия короткого замыкания по выводу $U_{вых}$
От -3,0 до -5 В	Выходной ключ закрыт, но микросхема не находится в режиме низкого энергопотребления. Не рекомендуется подавать напряжение на вывод SD/CT выше напряжения на выводе $U_{вх}$

Функциональные схемы рассматриваемых линейных стабилизаторов схожи; на рис. 1 приведена функциональная схема ИМС UCC284DP. Как можно увидеть из функциональной схемы, система управления строится на базе контроля за выходным напряжением, током нагрузки, имеется блок логики управления по защите от перегрузки, короткого замыкания и пр. Стоит отметить, что пороги срабатывания, определяющие переход работы ИМС из одного режима в другой, для отечественных приборов несколько отличаются от соответствующих для ИМС зарубежных аналогов.

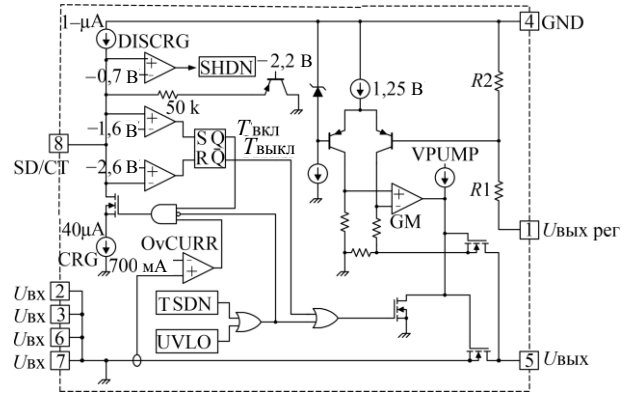


Рис. 1. Схема электрическая функциональная стабилизатора UCC284DP [13]

На основе электрической функциональной схемы, алгоритма работы микросхем и типовых схем подключения, рекомендованных производителями, разработаны поведенческие модели стабилизаторов 5348EM035 и 5348EP035 и их аналогов. На рис. 2 представлена поведенческая модель стабилизатора с регулируемым выходным напряжением.

Поведенческая модель разработана на базе типовых математических блоков [14], ограничителей, источников напряжения, управляемых напряжением, пассивных и активных элементов. Ограничения и зависимости между электрическими параметрами прописаны внутри управляемых источников математическими соотношениями и табличными функциями, что позволяет, в случае необходимости, осуществлять быструю коррекцию модели под разные типоминималы микросхем.

В модели, представленной на рис. 2 (правая часть рисунка), имеются следующие функциональные узлы: блок формирования тока потребления стабилизатора (реализован на источниках тока, управляемых напряжением  $G2$  и  $G3$ ); блок регулирования выходного напряжения по обратной связи (включает источник опорного напряжения 1,25 В; делитель напряжения  $R_{oc1}$ ,  $R_{oc2}$ ; источник напряжения, управляемый напряжением  $E3$ ; делитель напряжения  $R1$ ,  $R2$ ; вычитатель; умножитель; усилители и ограничители); блок защиты от перегрузки по току и короткого замыкания (включает источник напряжения, управляемый напряжением  $E2$ , вычитатель, задатчик на ток ограничения 700 мА, усилитель с ограничением).

Элементы блока регулирования выходного напряжения по обратной связи  $E3$ ,  $R1$ ,  $R2$ , источник опорного напряжения  $1,25$  и умножитель формируют задание на выходное напряжение согласно выражению (1):

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} (1 + R1/R2). \quad (1)$$

Левая часть схемы замещения, выполненная на опорных источниках, усилителях, логических элементах и ключах, обеспечивает реализацию режимов работы микросхемы, представленных в табл. 2.

Поведенческая модель стабилизатора с фиксированным выходным напряжением отличается от представленной отсутствием элементов блока регулирования выходного напряжения по обратной связи, реализующих выражение (1). При этом остается источник опорного напряжения  $1,25$  В, подключенный к положительному входу вычитателя, а номиналы делителя  $Roc1$ ,  $Roc2$  пересчитываются таким образом, чтобы обеспечить напряжение на выходе  $-5$  В.

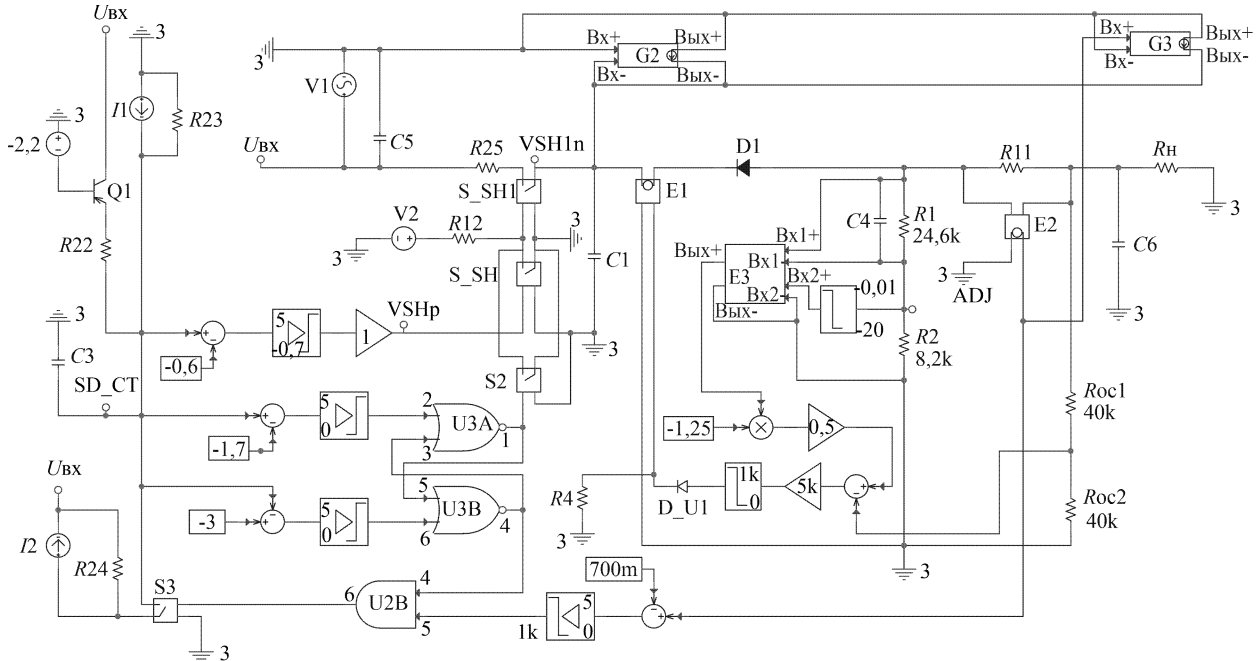


Рис. 2. Поведенческая модель стабилизатора 5348EP035

Разработанные поведенческие модели полностью имитируют поведение рассматриваемых линейных стабилизаторов, что позволяет использовать их списки соединений (нетлисты) для преобразования в формат поведенческой SPICE-модели. Подобное преобразование с публикацией нетлиста приведено в [15].

Поведенческие модели ИМС, составленные из математических блоков и других компонентов, преобразованы в формат поведенческих SPICE-моделей для использования в схемах в виде отдельных компонентов. Условно-графические отображения ИМС, соответствующие поведенческим моделям, реализованы с помощью PSpice Model Editor, входящего в программный комплекс OrCAD.

На рис. 3 и 4 представлены типовые схемы включения линейных стабилизаторов 5348EM035 и 5348EP035 и их аналогов, на основе которых и осуществлялись моделирование режимов работы микросхем и их верификация.

Применение поведенческой SPICE-модели ИМС значительно упрощает электрическую схему устройства (для сравнения см. рис. 2 и 4), снижает время моделирования [16] и вероятность появления ошибок в процессе проектирования более сложных устройств электропитания, построенных с применением линейных стабилизаторов.

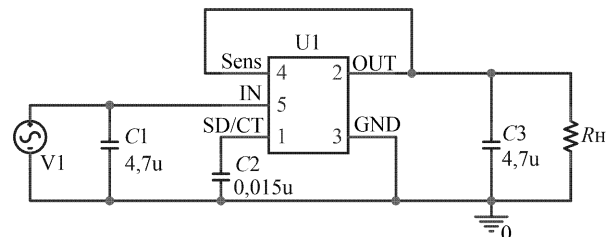


Рис. 3. Типовая схема включения микросхемы 5348EM035

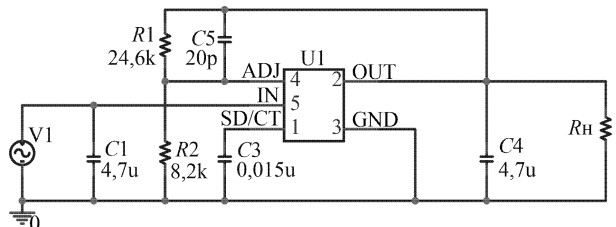


Рис. 4. Типовая схема включения микросхемы 5348EP035

### Результаты моделирования и верификации

Верификация результатов моделирования проведена в сравнении с данными из технического описания ИМС и экспериментальными данными отечественного производителя. Верификация проводилась по следующим параметрам: выходное напряжение в различных режимах работы микросхемы, включая работу регулируемого стабилизатора; падение напря-

жения на стабилизаторе; процессы переключения между рабочими режимами микросхемы и режимом защиты.

Моделирование работы ИМС 5348EM035 и 5348EP035 проводилось с подачей на вход питания (IN) напряжения  $U_{\text{пит}} = -8$  В (для фиксированного выходного напряжения) и  $U_{\text{пит}} = -10$  В (для регулируемого варианта) с небольшой огибающей амплитудой 0,1 В, имитирующей нестабильность входного напряжения. Измерения проводились как в режиме моделирования во временной области, так и в режиме по постоянному току. На рис. 5–7 представлены результаты моделирования полученных характеристик ИМС.

Так, для имитации выключения прибора (см. рис. 5) на вывод «выключение/управление» SD/CT подавался внешний сигнал блокировки величиной –4 В (2). Как видно из графика выходного напряжения стабилизатора (3), ИМС выходит из режима стабилизации в момент подачи сигнала блокировки (время подачи 10 мс); выходное напряжение плавно снижается до нулевого значения. Фронт выключения в зависимости от нагрузки и внешних конденсаторов может изменяться. При нагрузке 100 Ом полученный фронт в 1 мс повторяет результаты, полученные при физическом испытании микросхемы, с погрешностью не более 3%.

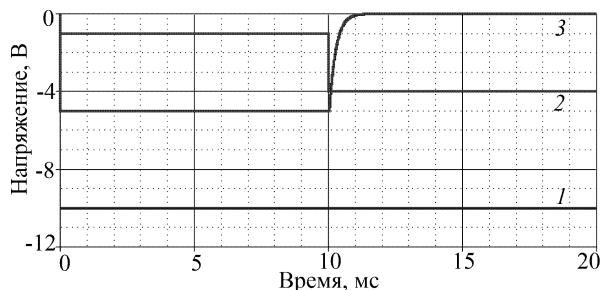


Рис. 5. Результат моделирования выключения стабилизатора: график 1 – входное напряжение; график 2 – напряжение на выводе «выключение/управление» SD/CT; график 3 – выходное напряжение стабилизатора (при сопротивлении нагрузки 100 Ом)

На рис. 6 представлен результат моделирования перехода ИМС из рабочего режима в режим защиты от КЗ и перегрузки, в котором контролируется изменение напряжения на выводе «выключение/управление» SD/CT, формируемое микросхемой. Данный режим работы получен снижением сопротивления нагрузки от значения 100 Ом до короткого замыкания, при котором ток нагрузки начинает неконтролируемо возрастать, и в работу модели включается блок защиты от перегрузки по току и короткого замыкания. С момента времени переключения в режим защиты (3 мс) выходной ключ начинает работать в квазиимпульсном режиме (1), при котором ИМС периодически выдает стабилизированное напряжение –5 В, оценивает ток нагрузки и при его превышении возвращается в режим защиты, при котором напряжение на выходе близко к 0. Процесс будет повторяться до тех пор, пока ток нагрузки не выйдет в диапазон допустимых токов, не превышающих

700 мА согласно техническому описанию микросхемы. Потенциал на выводе «выключение/управление» SD/CT (2) в рабочем режиме находится в диапазоне от –0,6 до –1,7 В и имеет значение –1,25 В, а в режиме защиты изменяется в диапазоне пороговых от –1,7 до –3,0 В.

Отношение времени нахождения выхода микросхем на уровне –5 В ко времени на уровне 0 В имеет значение 1 к 40, что соответствует техническим данным производителей.

При этом, как и в реальной микросхеме, значения напряжения вывода SD/CT формируются самой схемой.

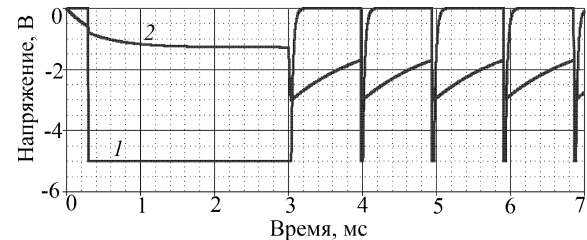


Рис. 6. Работа микросхемы в режиме защиты от короткого замыкания: 1 – выходное напряжение стабилизатора (при сопротивлении нагрузки 100 Ом до времени 3 мс и при коротком замыкании на выходе от времени 3 мс и далее); 2 – напряжение на выводе «выключение/управление» SD/CT

На рис. 7 представлен результат параметрического анализа работы ИМС с регулируемым выходным напряжением. Как можно увидеть, регулируемое выходное напряжение осуществляется точно по величине соотношения номиналов внешних резисторов  $R1$  и  $R2$  стабилизатора согласно выражению (1).

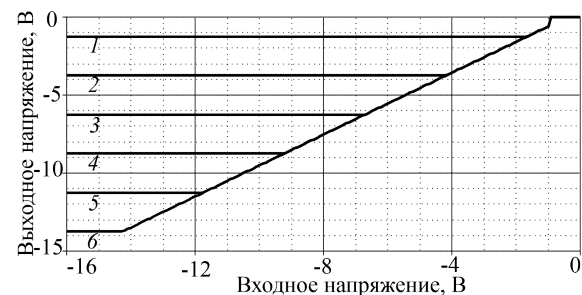


Рис. 7. Семейство выходных напряжений регулируемого стабилизатора при соотношении номиналов резисторов  $R1$  и  $R2$  от 0 (1) до 10 (6)

Результаты моделирования по постоянному току и во временной области подтверждают, что поведенческие модели воспроизводят основные электрические характеристики линейных стабилизаторов напряжения 5348EM035 и 5348EP035 и их аналогов в типовых схемах включения и обеспечивают переключение режимов работы ИМС по заданным алгоритмам разработчиков и производителей ИМС.

#### Заключение

Таким образом, удалось создать модели с открытым кодом на языке SPICE, что позволяет модифицировать их для различных исследовательских задач и использовать в специализированных САПР схемотехнического и имитационного моделирования в

составе сложных электрических схем. Разработанные поведенческие модели ИМС линейных стабилизаторов напряжения 5348EM035 и 5348EP035 и их функциональных аналогов полностью воспроизводят основные характеристики и режимы работы реальных микросхем с погрешностью не более 3%.

Применение представленных моделей позволяет сократить время при разработке и оптимизации схем электропитания, создании новых и модификации имеющихся продуктов микроэлектронного производства, а также снизить вероятность появления ошибок при компьютерном моделировании.

#### Литература

1. Andriyanov A.I. Parameters adaptation for target-oriented control of the buck converter // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, 2016. – P. 1–6.
2. Andriyanov A.I. A comparative analysis of efficiency of nonlinear dynamics control methods for a buck converter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Institute of Physics Publishing. – 2017. – P. 1–9.
3. Белоус И.А. NI MULTISIM – Возможности применения при проведении практикума на примере сравнительного моделирование стабилизаторов напряжения // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее. – Пенза, 2020. – С. 45–50.
4. Акулин А. Моделирование и расширенный анализ схем в PSpice / А. Акулин, А. Супонин // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2017. – № 10. – С. 82–91.
5. SimOne. Высокоэффективная система моделирования аналоговых схем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eremex.ru/products/delta-design/simone/>, свободный (дата обращения: 24.04.2023).
6. Драч В.Е. Моделирование электрических схем в современных САПР / В.Е. Драч, А.А. Корнеев, И.В. Чухраев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2017. – № 3. – С. 36–41.
7. Дракин А.Ю. Использование имитационных моделей при контроле параметров интегральных микросхем / А.Ю. Дракин, А.Н. Школин, А.А. Пугачев // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_48\\_drakin\\_shkolin\\_pugachev.pdf\\_afb5f376ee.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_48_drakin_shkolin_pugachev.pdf_afb5f376ee.pdf) (дата обращения: 19.04.2023).
8. Asparuhova K. IGBT Behavioral PSPICE Model / K. Asparuhova, T. Grigороva // 2006 25th International Conference on Microelectronics. – Belgrade, Serbia, 2006. – P. 203–206.
9. Sazhnev A.M. The Behavioral Models of Suppressors and Devices Based on Them / A.M. Sazhnev, L.G. Rogulina // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, 2021. – P. 360–364.
10. Jimenez A. Low-complexity SPICE Analog Behavioral Modeling of the ideal battery for system level design / A. Jimenez, N. Morales, C. Páez, A. Fajardo, G. Perilla // 2020 IEEE ANDESCON. – Quito, Ecuador, 2020. – P. 1–5.
11. Петраков О.М. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов // РадиоСофт. – 2004. – 208 с.
12. Новые разработки 2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://group-kremny.ru/katalog-izdeliy-elektronnoy-tehniki/Новые%20разработки%202023.pdf>, свободный (дата обращения: 22.04.2023).
13. UCC284DP-ADJ Low-Dropout 0.5-A Negative Linear Regulator [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.ti.com/product/UCC284/part-details/UCC284DP-ADJ>, свободный (дата обращения: 17.04.2022).

14. Ahanchian A. Simulation of an analog differential capacitive accelerometer / A. Ahanchian, B.Y. Majlis // 2004 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2004. – P. 4.

15. Малаханов А.А. Поведенческая модель линейного стабилизатора напряжения на языке Spice // САПР и моделирование в современной электронике. – Брянск, 2019. – С. 182–186.

16. Behavioral Modeling of Current Reference for LEDs Control Applications / L.A. Gheorghe, L. Dobrescu, S.Ş. Vărzaru, M. Crăciun, D. Dobrescu // 2020 International Semiconductor Conference (CAS). – Sinaia, Romania, 2020. – P. 229–232.

#### Малаханов Алексей Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент, заведующий каф. электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем (ЭРЭиЭС) Брянского государственного технического университета (БГТУ)  
50 лет Октября б-р, 7, г. Брянск, Россия, 241035  
ORCID: 0000-0003-2512-8206  
Тел.: +7 (483-2) 56-36-02  
Эл. почта: malakhan@yandex.ru

#### Малаханова Алла Григорьевна

Канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированных технологических систем (АТС) Брянского государственного технического университета (БГТУ)  
50 лет Октября б-р, 7, г. Брянск, Россия, 241035  
ORCID: 0000-0002-8194-7372  
Тел.: +7 (483-2) 58-82-85  
Эл. почта: alovd@mail.ru

#### Васильева Юлия Олеговна

Вед. инж. научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии» (СЭИИТ) БГТУ  
50 лет Октября б-р, 7, г. Брянск, Россия, 241035  
ORCID: 0009-0000-5236-4832  
Тел.: +7-920-868-05-96  
Эл. почта: yuvasileva23@yandex.ru

#### Malakhanov A.A., Malakhanova A.G., Vasil'eva Yu.O. Development and verification of behavioral models of linear voltage regulators with duty cycle short circuit and overload protection

The object of development are behavioral models of a linear negative voltage regulator in two modifications. Linear voltage regulators manufactured by KREMNIY EL GROUP JSC were chosen as prototypes for the models. IC 5348EM035 with a fixed output negative voltage value of 5 V, IC 5348EP035 with an adjustable output negative voltage value of 1.25V to 14.5V and their functional analogue IC UCC284DP manufactured by Texas Instruments were used. These are low voltage drop with duty cycle short circuit and overload protection regulators. Behavioral models are implemented in SPICE language through converting netlists of prototype equivalent circuits. Equivalent circuits on the regulators IC functional circuits were made, taking into account a typical switching circuit. Equivalent circuits

of regulators are implemented on the standard mathematical blocks, limiters, dependent sources, controlled switches and passive elements. Parameter limits are written inside controlled sources by mathematical relations. When verifying behavioral models, it was established that the results of modeling the regulators operation correspond to the data in the technical descriptions of manufacturers. The verification was carried in typical switching circuits with given input electrical parameters. In present study the results of modeling the main characteristics of microcircuits are described: input and output voltages, voltage drop across the regulator and timing diagrams of the main modes of operation of the IC, including the mode of duty cycle short circuit and overload protection regulators. The developed and verified behavioral models of linear voltage regulators 5348EM035 and 5348EP035 and their functional analogue UCC284DP will be useful in the engineering, design and study of the characteristics of power supply devices for electronic and industrial equipment. These SPICE models are applicable in modern specialized CAD systems for circuit design and simulation.

**Keywords:** linear voltage regulator, integrated circuit, behavioral model, OrCAD, SPICE, modeling.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-2-103-108

### References

1. Andriyanov A.I. Parameters adaptation for target-oriented control of the buck converter. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Moscow, 2016, pp. 1–6.
2. Andriyanov A.I. A comparative analysis of efficiency of nonlinear dynamics control methods for a buck converter. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2017, pp. 1–9.
3. Belous I.A. Comparative modeling of voltage regulators of secondary power supplies in the NI Multisim package. *Nauka i obrazovanie: sokhranyaya proshloe, sozdaem budushchee [Science and Education: we create the future by preserving the past]*. Penza, 2020, pp. 45–50 (in Russ.).
4. Akulin A. Suponin A. Simulation and advanced circuit analysis using PSpice. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2017, no. 10, pp. 82–91 (in Russ.).
5. SimOne Highly efficient analog circuit simulation system. Available at: <https://www.aremex.ru/products/delta-design/simone/>, free (Accessed: April 24, 2023).
6. Drach V.E., Korneev A.A., Chukhraev I.V. Schematic simulation in modern EDA. *Journal Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2017, no. 3, pp. 36–41 (in Russ.).
7. Drakin A.Yu., Shkolin A.N., Pugachev A.A. Application of simulation models to the IC parameters testing of pulse voltage converters. *Engineering Journal of Don*, 2019, no. 3. Available at: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_48\\_drakin\\_shkolin\\_pugachev.pdf\\_afb5f376ee.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_48_drakin_shkolin_pugachev.pdf_afb5f376ee.pdf), free (Accessed: April 19, 2023).
8. Asparuhova K., Grigorova T. IGBT Behavioral PSPICE Model 2006 25th International Conference on Microelectronics. Belgrade, Serbia, 2006, pp. 203–206.
9. Sazhnev A.M., Rogulina L.G. The Behavioral Models of Suppressors and Devices Based on Them. 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russian Federation, 2021, pp. 360–364.
10. Jimenez A., Morales N., Páez C., Fajardo A., Perilla G. Low-complexity SPICE Analog Behavioral Modeling of the ideal battery for system level design. 2020 IEEE ANDESCON. Quito, Ecuador, 2020, pp. 1–5.
11. Petrakov O.M. *Sozdanie analogovykh PSPICE-modelei radioelementov*. [Creation of analog PSPICE models of radioelements]. 2004, 208 p. (in Russ.).
12. New developments 2023. Available at: <https://group-kremny.ru/katalog-izdeliy-elektronnoy-tehniki/Новые%20разработки%202023.pdf>, free (Accessed: April 22, 2023).
13. UCC284DP-ADJ Low-Dropout 0.5-A Negative Linear Regulator. Available at: <https://www.ti.com/product/UCC284/part-details/UCC284DP-ADJ>, free (Accessed: April 17, 2022).
14. Ahanchian A., Majlis B.Y. Simulation of an analog differential capacitive accelerometer. 2004 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics. Kuala Lumpur, Malaysia, 2004, pp. 4.
15. Malakhanov A.A. Behavioral model of a linear voltage stabilizer in the Spice language. *CAD/EDA/Simulation in Electronics*. Bryansk, 2019, pp. 182–186 (in Russ.).
16. Gheorghe L.A., Dobrescu L., Vărzaru S.Ș., Crăciun M., Dobrescu D. Behavioral Modeling of Current Reference for LEDs Control Applications. 2020 International Semiconductor Conference (CAS). Sinaia, Romania, 2020, pp. 229–232.

### Alexey A. Malakhanov

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Electronic, Radioelectronic and Electrical Engineering Systems, Bryansk State Technical University (BSTU)  
7, 50 years of October Blvd., Bryansk, Russia, 241035  
ORCID: 0000-0003-2512-8206  
Phone: +7 4832 56 36 02  
Email: malakhan@yandex.ru

### Alla G. Malakhanova

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Department of Automated Technological Systems, Bryansk State Technical University (BSTU)  
7, 50 years of October Blvd., Bryansk, Russia, 241035  
ORCID 0000-0002-8194-7372  
Phone: +7 (483-2) 58-82-85  
Email: alovd@mail.ru

### Yulia O. Vasil'eva

Lead Engineer, Scientific and Educational Design Center «Power Electronics and Integrated Technologies» BSTU  
7, 50 years of October Blvd., Bryansk, Russia, 241035  
ORCID: 0009-0000-5236-4832  
Phone: +7-920-868-05-96  
Email: yuvasileva23@yandex.ru