

## Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 531.1

doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-42-48

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Михаил Иванович Вольников**

Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия

vmi1972@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9747-6667>

**Аннотация.** Актуальность обусловлена недостаточной изученностью и разработанностью моделей движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), к которым относятся все возможные дроны и, в частности, различные коптеры в подвижной и турбулентной атмосфере. Беспилотные летательные аппараты применяются как в мирных отраслях промышленности, так и в военном деле [1 – 4]. При эксплуатации БПЛА в реальных условиях на их движение оказывают воздействия возмущения со стороны воздушных масс [5, 6], носящие в общем случае случайный характер. При этом оператор сталкивается с неадекватным поведением БПЛА, вызванным возмущениями, что затрудняет его управление. Целью статьи является моделирование сложного движения БПЛА, в основном квадрокоптеров, в пространстве для понимания динамики полета БПЛА под действием нескольких сил. Модели базируются на кинематике и динамике материальной точки, в виде которой представлен БПЛА, участвующей в сложном: относительном и переносном движениях. Описаны кинематические модели движения дронов на основе преобразования координат. Представлены плоскостные и пространственные траектории движения БПЛА.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, траектория движения, преобразование координат, модели движения

**Для цитирования:** Вольников М.И. Моделирование движения беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №3 (21). С. 42-48. doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-42-48.

Original article

Open Access Article

### MODELLING THE MOVEMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

**Mikhail I. Volnikov**

Penza State Technological University, Penza, Russia

vmi1972@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9747-6667>

**Abstract.** The relevance is due to insufficient knowledge and development of movement patterns for unmanned aerial vehicles (UAVs), which include all possible drones and, in particular, various copters in mobile and turbulent atmosphere. Unmanned aerial vehicles are used both in civilian industries and in military affairs [1 – 4]. When operating UAVs in real conditions, their movement is affected by disturbances from air masses [5, 6], which are generally random in nature. At the same time, the operator is faced with inadequate UAV behaviour caused by disturbances, which makes it difficult to control. The aim of the article is to simulate the complex movement of UAVs, mainly quadcopters, in space to understand the dynamics of UAV flight under the influence of several forces. The models are based on kinematics and dynamics of a material point, in the form of which the UAV is represented, involved in complex relative and translational movements. Kinematic models of drone movement patterns based on coordinate transformation are described. Planar and spatial trajectories of UAV movement are presented.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, movement trajectory, coordinate transformation, movement pattern

**For citation:** Volnikov M.I. Modelling the Movement of Unmanned Aerial Vehicles. Automation and modeling in design and management, 2023, no. 3 (21). pp. 42-48. doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-42-48.

## Ведение

В настоящее время применение и эксплуатация БПЛА носит повсеместный характер: от мирного гражданского назначения в виде картографов, опылителей полей, для определения очагов пожаров, мини почталыонов до средства технической разведки или ударной силы в армии. Беспилотные летательные аппараты стремительно совершенствуются, требуя новых подходов к эксплуатации в любых условиях, что побуждает необходимость подготовки людей, которые будут их эксплуатировать.

В работе рассматривается эксплуатация БПЛА (дронов) в реальных условиях, когда на их движение оказывают воздействия перемещения воздушных масс, носящие в общем случае случайный характер. Причины таких случайных воздействий – многосторонние. Это могут быть резкие изменения скорости воздушных поток, вызванных разницей в давлениях в атмосфере при циклонических вихрях, или смена направления движения воздушных масс на различных высотах. Другой причиной может являться подветренный ротор [7], представляющий собой завихрение воздуха за препятствием по направлению ветра. Выпадающие осадки, изменяя плотность атмосферы, также воздействуют на траекторию движения дрона.

В то же время в работе не рассматриваются возмущения в виде природных или искусственных аномалий, вызванных воздействием электромагнитного излучения (средств радиоэлектронной борьбы [8, 9]) или терриконов с высоким содержанием металлических примесей, способных изменить траекторию движения дрона, вплоть до его падения, вследствие отказа электронной части. Это вопрос другой темы.

Учет всех возможных причин, влияющих на траекторию БПЛА, позволит создавать алгоритмы для корректирования управляющих воздействий на объект управления, при наличии внешних возмущений, разрабатывая более совершенные летательные аппараты с компенсацией возмущений для чего необходим синтез системы активной автоматической стабилизации беспилотника [10].

Для стабилизации траектории движения дронов необходимо понять возможные варианты их движения, чтобы определить наиболее уязвимые места, приводящие к потере управляемости [11]. Для этого необходимо разработать модели их движения, что является основной задачей данной статьи.

### Модели движения беспилотных летательных аппаратов

На первом этапе проведем анализ и моделирование движения дронов. Сложное движение дронов, представленных в виде материальной точки  $M$  и попадающих в вихревую турбулентную субстанцию, представляет собой движение по окружности радиуса  $R$  с угловой скоростью  $\omega$  в некотором сечении облака турбулентности, которое само совершает вращательное движение с угловой скоростью  $\omega_1$  относительно оси, параллельной плоскости окружности вращения БПЛА и касающейся окружность в некоторой точке  $B$  (рис. 1).

Движение дрона – сложное, его движение по окружности радиуса  $R$  относительно, а вращение его плоскости – переносное [12]. Абсолютная скорость дрона определяется выражением:

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{отн}} + \vec{v}_{\text{пер}}, \quad (1)$$

$$\text{где } v_{\text{отн}} = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\phi}{dt} - \text{относительная скорость,} \quad (2)$$

$$\text{а } v_{\text{пер}} = R_1 \cdot \omega_1 - \text{переносная скорость дрона,} \quad (3)$$

где  $R_1$  – радиус окружности, описываемой той точкой окружности радиуса  $R$ , с которой совпадает в данный момент  $t$ .  $M$  (расстояние от  $t$ .  $M$  до оси вращения воздушных масс).

$$R_1 = 2R + R(1 + \cos\beta) = R(1 + \cos\beta);$$

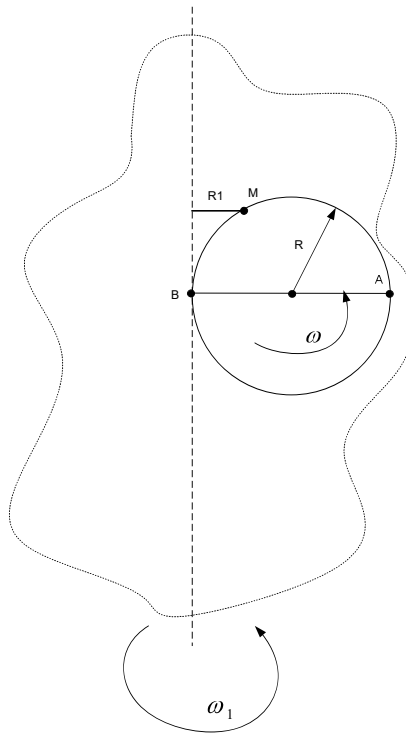
а  $\omega_1$  – модуль угловой скорости плоскости окружности радиуса  $R$ :

$$\omega_1 = |\vec{\omega}_1| = \frac{d\phi}{dt} \text{ и } v_{\text{пер}} = R(1 + \cos\beta) \cdot \frac{d\phi}{dt}. \quad (4)$$

$$\text{Модуль переносной скорости: } v_{\text{пер}} = R_1 \cdot \omega_1 = R_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}.$$

Вектор  $\vec{v}_{\text{пер}}$  направлен по касательной к окружности в сторону вращения тела.

Абсолютная скорость  $t$ .  $M$  – геометрическая сумма относительной и переносной скоростей  $\vec{v} = \vec{v}_{\text{отн}} + \vec{v}_{\text{пер}}$ . Векторы  $\vec{v}_{\text{отн}}$  и  $\vec{v}_{\text{пер}}$  взаимно перпендикулярны.



**Рис. 1. Сложное движение БПЛА в вихревом облаке**  
**Fig. 1. Complex drone movement in a swirling cloud**

Модуль абсолютной скорости найдем как геометрическую сумму относительной и переносной скоростей:

$$v = \sqrt{v_{\text{отн}}^2 + v_{\text{пер}}^2}, \quad (5)$$

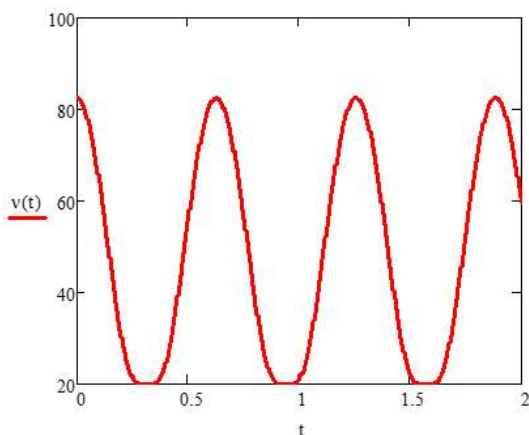
тогда подставив выражения (2) и (4) в (5), получим:

$$v = \sqrt{\left(R \frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(R(1 + \cos\beta) \cdot \frac{d\varphi}{dt}\right)^2} = R \sqrt{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left((1 + \cos\beta) \cdot \frac{d\varphi}{dt}\right)^2}.$$

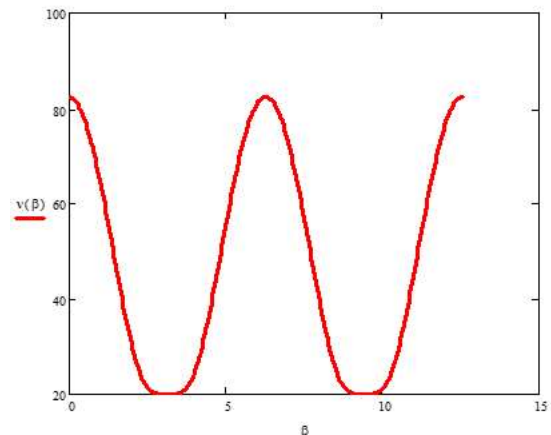
Угол  $\beta$  определяется угловой скоростью дронов, т.е.  $\beta = \omega t$ .

### Моделирование условий

При  $\omega = 10$ ,  $\omega_1 = 20$ ,  $R = 2$  и при  $t = 0$ ,  $\beta = 0$  зависимость абсолютной скорости дронов от времени и угла поворота приведены на рис. 2 и 3.



**Рис. 2. Зависимость абсолютной скорости дронов от времени**  
**Fig. 2. Dependence of the absolute speed of drones on time**



**Рис. 3. Зависимость абсолютной скорости дронов от угла поворота**  
**Fig. 3. Dependence of the absolute speed of drones on the angle of rotation**

## Моделирование траектория движения

Траектория движения разведывательных дронов строится путем преобразования координат при движении плоскости вращения дрона относительно оси  $O_1O_2$ , приняв за неподвижную систему, начало которой совпадает с точкой касания плоскости вращения БПЛА и оси вращения воздушных масс.

Преобразование координат имеет вид [13]:

$$\begin{cases} z' = z \\ x' = x \cos \psi - y \sin \psi \\ y' = x \sin \psi + y \cos \psi \end{cases} \text{ — координаты в неподвижной системе отсчета при вращении плоскости дрона,}$$

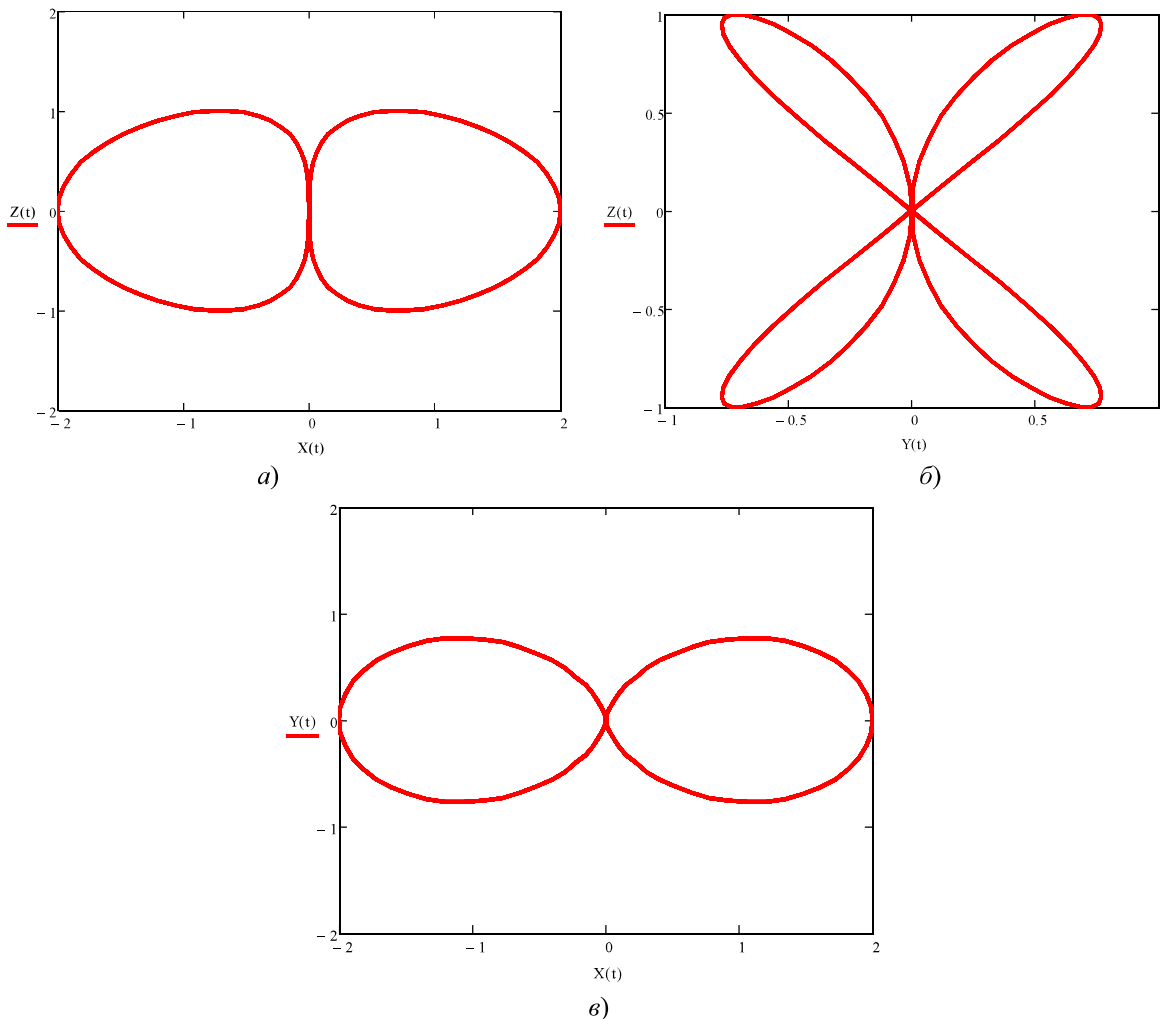
где

$$\begin{cases} z = R \sin \varphi \\ x = R(1 + \cos \varphi) \\ y = 0 \end{cases} \text{ — координаты в неподвижной системе отсчета при отсутствии поворота.}$$

Здесь  $\varphi = \omega t$ , а  $\psi = \omega_1 \cdot t$  и

$$\begin{cases} z' = z = R \sin \omega t \\ x' = R(1 + \cos \omega t) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) - y \sin(\omega_1 \cdot t) \\ y' = R(1 + \cos \omega t) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + y \cos(\omega_1 \cdot t) \end{cases} \quad (6)$$

При  $\omega_1 = \pi$ ,  $\omega = 2\pi$  и  $R = 1$  и начальном положении дрона в т.  $A$  (см. рис. 1) проекции его траекторий на плоскости  $XY$ ,  $XZ$  и  $YZ$  приведены на рис. 4 на основе использования (6).



**Рис. 4. Проекция траектории дрона на плоскость:**  
*a* – XZ, *б* – YZ, *в* – XY  
**Fig. 4. Projection of the drone trajectory onto the plane:**  
*a* – XZ, *b* – YZ, *c* – XY

Пространственная траектория дрона строится с использованием функции MATHCAD, программа расчета приведена ниже:

$$\begin{aligned} \omega &:= 2\pi & \omega_1 &:= \pi \\ y &:= 0 & r &:= 1 \\ y_1(t) &:= r \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ x_1(t) &:= r \cdot (1 + \cos(\omega \cdot t)) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) - y \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \\ y_1(t) &:= r \cdot (1 + \cos(\omega \cdot t)) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + y \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \\ R(t) &:= \begin{pmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ y_1(t) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$M := \text{GreateSpace}(R, 0, 2, 200),$$

где  $R(t)$  – вектор параметрических уравнений координат.

Здесь числа 0 и 2 отвечают за нижнюю и верхнюю границы переменной,  $tgrid = 200$  – число линий сетки CreateSpace [14].

Траектории БПЛА в пространстве приведены на рис. 5.

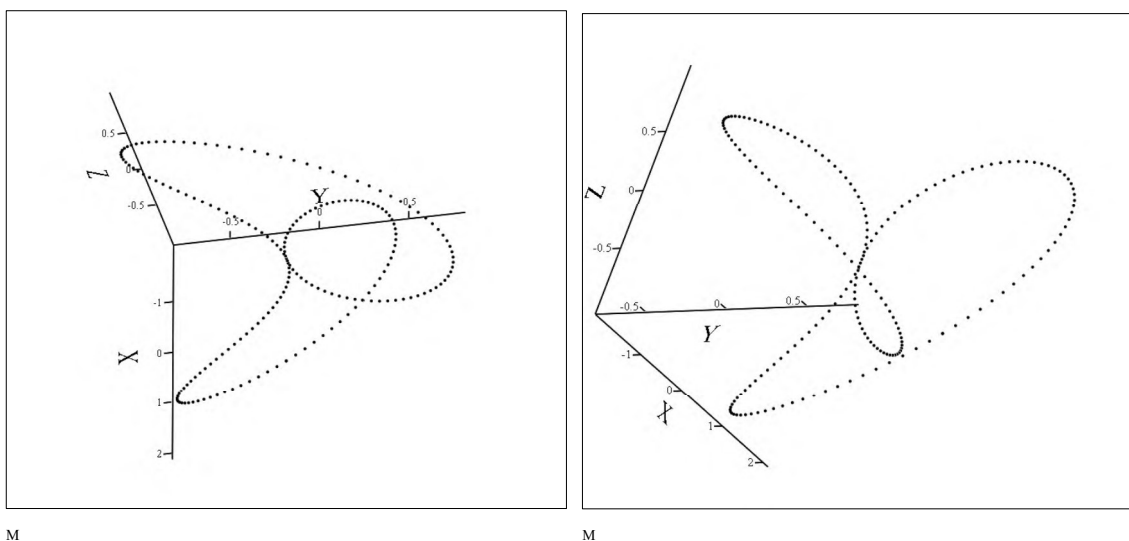


Рис. 5. Траектории дрона в пространстве  
*Fig. 5. Drone trajectories in space*

### Перспективы исследований

Перспективы использования рассмотренных моделей движения дронов просматриваются как в интересах оборонного ведомства, сельского хозяйства, геодезии, так и фундаментальных и прикладных исследований беспилотных летательных аппаратов.

Применение разработанных моделей в сочетании с искусственным интеллектом на базе нейронных сетей позволит избежать сложностей для оператора при управлении БПЛА [15], когда основную часть расчетов по корректированию траектории движения дрона при возмущениях будет производить нейронная сеть, программа функционирования которой должна быть заложена в контроллер управления беспилотников [16], а задача оператора заключалась бы только в управлении перемещением дрона по намеченному пути.

В дальнейшем предлагается продолжить работу в рамках совершенствования математических моделей БПЛА, для учета влияния природных или искусственных аномалий, вызванных воздействием электромагнитного излучения, чтобы добиться наилучших динамических характеристик беспилотника при полете с учетом многомерного вектора возмущений.

### Выводы

1. Получены и изучены кинематические модели движения дронов в пространстве при перемещении воздушных масс с целью выяснения степени сложности траекторий их движений.
2. Для получения моделей сложного движения использованы математические методы

пространственного преобразования координат. Представлены модели траектории движения БПЛА типа дронов.

3. Представленные на рисунках пространственные наглядные траектории движения дронов позволяют судить о чрезвычайной сложности картины движения, однако плоскостные фигуры позволяют сделать вывод о симметричности движения разведывательных дронов в координатных плоскостях.

#### Список источников:

1. Туев А.В. Применение робототехники и БПЛА в сельском хозяйстве // Молодежь и наука. 2020. № 4. С. 30.
2. Ахмедов Б., Ахмедова Г. Применение БПЛА при сборе геосpatialных данных с целью решения инженерных задач в городском строительстве // Danish Scientific Journal. 2021. № 46-1. С. 41-45.
3. Харичкин А.И., Рогов К.С., Драницын А.В. // Применение современных методов аэрофотосъемки на основе БПЛА для проектирования мероприятий инженерной защиты от опасных геологических процессов // Вестник НИЦ Строительство. 2021. № 2(29). С. 123-135.
4. Турик А.А., Мирошников В.И., Гончаров С.А. Применение БПЛА сторонами при ведении боевых действий в СА // Вестник научных конференций. 2018. № 5-1(33). С. 112-115.
5. Малкин В.А., Рожков И.В., Санько А.А. Влияние ветровых возмущений и нелинейностей сервопривода на контур стабилизации высоты полета беспилотного летательного аппарата // Системный анализ и прикладная информатика. вып. 2. 2019. стр. 23-30.
6. Санько А.А., Шейников А.А. Моделирование ветровых возмущений, действующих на блок чувствительных элементов навигационной системы в вертикальном канале БЛА // Авиационный вестник. 2022. № 6. С. 68-76.
7. Шакина Н.П. Механизмы образования орографической турбулентности и ее прогнозирование // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 1(371). С. 25-47.
8. Бурлаков Д.О. Анализ методов обнаружения военных дронов и меры борьбы с ними // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 9(137).
9. Титков О.С., Мухаметжанова А.О. Современные пути развития систем противодействия БАС // Авиационные системы. 2022. № 4. С. 44-53.
10. Вольф Д.А., Александров В.А., Резков И.Г. Автоматизация поведения пилота БПЛА с применением отечественного микроконтроллера // Промышленные АСУ и контроллеры. 2023. № 3. С. 9-16.
11. Algorithm for Control of Unmanned Aerial Vehicles in the Process of Visual Tracking of Objects with a Variable Movement's Trajectory / A.A. Adnastarontsau, D.A. Adnastarontsava, R. V. Fiodortsev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 46-57.
12. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: учеб. Для студ. Втузов (гриф МО). 12-е изд., стереотип. М.: Высш. шк., 2002. 416 с.
13. Матрица поворота в трехмерном пространстве – URL: <https://stepstosleep.ru/матрица-поворота-в-трехмерном-прост/> (дата обращения 25.04.2023).
14. Акишин Б.А., Эркенов Н.Х. Прикладные математические пакеты. Часть 1. MathCAD. СПб.: РадиоСофт, 2009. 132 с.

#### References:

1. Tuev A.V. Application of Robotics and UAVs in Agriculture. Youth and Science. 2020;4:30.
2. Akhmedov B., Akhmedova G. Using UAV in Collecting Geospatial Data for the Purpose of Solving Engineering Problems in Urban Construction. Danish Scientific Journal. 2021;46-1:41-45.
3. Kharichkin A.I., Rogov K.S., Dranitsyn A.V. The Use of Modern Methods of Aaerophotography Based on UAVs for the Project of Engineering Protection Measures Against Dangerous Geological Processes. Bulletin of Science and Research Centre of Construction. 2021;2(29):123-135.
4. Turik A.A., Miroshnikov V.I., Goncharov S.A. The Use of UAVs by the Parties in the Conduct of Hostilities in the SAR. Bulletin of Scientific Conferences. 2018;5-1(33):112-115.
5. Malkin V.A., Rozhkov I.V., Sanko A.A. Influence of Wind Disturbances and Nonlinearities of Servo Drive on the Contour of Stabilization of the Flight Height of Unmanned Aerial Vehicle. System Analysis and Applied Information Science. 2019;2:23-30.
6. Sanko A.A., Sheinikov A.A. Modelling Wind Disturbances Acting on the Sensitive Element Block of the Navigation System in the UAV Vertical Channel. Aviation Bulletin. 2022;6:68-76.
7. Shakina N.P. Orographic Turbulence: Generation Mechanisms and Forecasting. Hydrometeorological Research and Forecasts. 2019;1(371):25-47.
8. Burlakov D.O. Analysing Methods for Detecting and Controlling Military Drones. Modern Scientific Researches and Innovations. 2022;9(137).
9. Titkov O.S., Mukhametzhanova A.O. Modern Ways of Anti-Unmanned Aerial Vehicle System Development. Aviation Systems. 2022;4:44-53.
10. Wolf D.A., Aleksandrov V.A., Rezkov I.G. Automation of the UAV Pilot's Behaviour Using a Native Microcontroller. Industrial ACS and Controllers. 2023;3:9-16.
11. Adnastarontsau AA, Adnastarontsava DA, Fiodortsev RV, et al. Algorithm for Control of Unmanned Aerial Vehicles in the Process of Visual Tracking of Objects With a Variable Movement's Trajectory. Devices and Methods of Measurements. 2021;12(1):46-57.
12. Targ S.M. Theoretical Mechanics – A Short Course. Moscow: Vysshaya shkola; 2002.
13. Rotation Matrix in Three-Dimensional Space [Internet] [cited 2023 Apr 25]. Available from: <https://stepstosleep.ru/rotation-matrix-in-three-dimensional-simple/>
14. Akishin B.A., Erkenov N.Kh. Applied Mathematical Packages. Part 1. MathCAD. Saint Petersburg: RadioSoft; 2009.

15. Кудрявченко И.В., Якубов К.С., Паламарчук Д.В. Особенности применения искусственного интеллекта для организации роя малоразмерных БПЛА // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2020. № 3. С. 173.

16. Algorithm for Control of Unmanned Aerial Vehicles in the Process of Visual Tracking of Objects with a Variable Movement's Trajectory / A. A. Adnastarontsau, D. A. Adnastarontsava, R. V. Fiodortsev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. 2021. Vol. 12. No. 1. P. 46-57.

15. Kudryavchenko I.V., Yakubov K.S., Palamarchuk D.V. Features of Artificial Intelligence Usage for Organisation of a SUAS Swarm. Modern Issues in Radioelectronics and Telecommunications. 2020;3:173.

16. Adnastarontsau AA, Adnastarontsava DA, Fiodortsev RV, et al. Algorithm for Control of Unmanned Aerial Vehicles in the Process of Visual Tracking of Objects With a Variable Movement's Trajectory. Devices and Methods of Measurements. 2021;12(1):46-57.

#### **Информация об авторах:**

**Вольников Михаил Иванович**

кандидат технических наук, доцент Пензенского государственного технологического университета

#### **Information about the authors:**

**Volnikov Mikhail Ivanovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Penza State Technological University

**Статья поступила в редакцию 16.06.2023; одобрена после рецензирования 21.08.2023; принята к публикации 28.08.2023.**

**The article was submitted 16.06.2023; approved after reviewing 21.08.2023; accepted for publication 28.08.2023.**

**Рецензент** – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.316.722.1+519.876.5

doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-49-58

## РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ОТРИЦАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ MC79L И ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АНАЛОГОВ

Алексей Алексеевич Малаханов<sup>1✉</sup>, Алла Григорьевна Малаханова<sup>2</sup>,  
Юлия Олеговна Васильева<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> malakhan@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2512-8206>

<sup>2</sup> alovd@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8194-7372>

<sup>3</sup> yuvasileva23@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0000-5236-4832>

**Аннотация.** Целью исследования является разработка и верификация поведенческих моделей линейного стабилизатора отрицательного напряжения. В настоящей работе представлен процесс создания поведенческих моделей линейного стабилизатора отрицательного напряжения с фиксированным значением выходного напряжения 3,3 В и с регулируемым отрицательным выходным напряжением от значения опорного напряжения 1,25 В до 20 В. В качестве прототипа модели выбран стабилизатор MC79L производства OnSemiconductor и его ближайшие функциональные аналоги LM337L, LT1964, LT3032. Поведенческие модели линейных стабилизаторов реализованы на языке SPICE на основе функциональных блоков, реализующих математические зависимости и ограничения. Моделирование интегральных микросхем проведено во временной области и в статическом режиме в программном комплексе сквозного моделирования OrCad. Верификация моделирования подтвердила адекватность результатов данным, представленным в техническом описании производителей микросхем. Предложенная поведенческая модель линейного стабилизатора может быть применена в современных специализированных САПР схемотехнического и имитационного моделирования при разработке, проектировании и исследовании устройств электропитания радиоэлектронного и промышленного оборудования.

**Ключевые слова:** поведенческая модель, Spice-модель, OrCAD, линейный стабилизатор напряжения, интегральная микросхема

**Для цитирования:** Малаханов А.А., Малаханова А.Г., Васильева Ю.О. Разработка и верификация поведенческих моделей линейного стабилизатора отрицательного напряжения MC79L и его функциональных аналогов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №3 (21). С. 49-58. doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-49-58.

Original article

Open Access Article

## DEVELOPING AND VERIFYING BEHAVIOURAL MODELS OF MC79L LINEAR NEGATIVE VOLTAGE REGULATOR AND ITS FUNCTIONAL ANALOGUES

Alexey A. Malakhanov<sup>1✉</sup>, Alla G. Malakhanova<sup>2</sup>, Yulia O. Vasilyeva<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Bryansk State Technical University; Bryansk, Russia

<sup>1</sup> malakhan@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2512-8206>

<sup>2</sup> alovd@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8194-7372>

<sup>3</sup> yuvasileva23@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0000-5236-4832>

**Abstract.** The aim of the study is to develop and verify behavioural models of a linear negative voltage regulator. This paper presents the process of building behavioural models of a linear negative voltage regulator with 3.3 V fixed value of the output voltage and with an adjustable negative output voltage from the reference voltage value of 1.25 V to 20 V. As a prototype model, the MC79L stabilizer manufactured by OnSemiconductor and its closest functional analogues LM337L, LT1964, LT3032 are selected. Behavioural models of linear stabilizers are implemented



*in the SPICE language based on functional blocks that fulfil mathematical dependencies and constraints. Simulating integrated circuits is carried out in the time domain and in static modes using the OrCad end-to-end simulation software package. The simulation verification confirms the data result adequacy presented in the chip manufacturers' technical specifications. The proposed behavioural model of a linear stabilizer can be applied in modern specialized CAD systems for circuit design and simulation in developing, designing and studying power supply devices for radio-electronic and industrial equipment.*

**Keywords:** behavioural model, Spice model, OrCAD, linear voltage regulator, integrated circuit

**For citation:** Malakhanov A.A., Malakhanova A.G., Vasilyeva Yu.O. Developing and Verifying Behavioural Models of MC79L Linear Negative Voltage Regulator and Its Functional Analogues. Automation and modeling in design and management, 2023, no. 3 (21). pp. 49-58. doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-49-58.

## Введение

Проектирование систем управления современными вторичными источниками электропитания требует применения специализированных интегральных микросхем (ИМС). Наиболее распространенными ИМС для систем управления вторичными источниками электропитания невысокой мощности являются стабилизаторы линейного или импульсного способов преобразования. Линейные стабилизаторы, в отличие от импульсных [1, 2], менее склонны к возникновению нелинейных динамических режимов, не генерируют высокочастотные помехи в сеть и могут быть использованы в качестве фильтров для импульсных источников питания [3].

Для применения в реальном электронном устройстве ИМС необходимо оценить ее возможности предварительным компьютерным имитационным и схемотехническим моделированием, с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР). Моделирование поведения разрабатываемой микросхемы в различных режимах работы позволяет оценить ее параметры и возможность применения в заданных условиях. Возможность корректировать параметры изделий и вносить соответствующие изменения в технологический процесс производства до начала изготовления устройств, предоставленная методами компьютерного моделирования, является для производителей существенным способом снижения трудовых, временных и финансовых затрат.

Поведенческие модели (ПМ), описывают функционал интегральной микросхемы, задают соответствие входных и выходных сигналов системы, имитируя ее работу с заданной точностью. Поведенческие модели могут быть использованы при анализе работы микросхем в режимах по постоянному току, во временной и частотных областях, при параметрическом анализе и других исследованиях. Модели могут имитировать поведение микросхем как при нормальных условиях внешней среды, так и в случае их изменений.

Рассмотренные в настоящей работе ПМ реализованы на языке SPICE, они не учитывают всю внутреннюю логику устройства и все связи, поэтому они не могут быть использованы для дальнейшего синтеза принципиальной схемы. Такая структура модели обусловлена основным ее применением – предварительным моделированием работы устройства для анализа разработанной архитектуры и принятых принципов работы.

Для верификации полученных Spice-моделей с реальными микросхемами моделирование проводилось в программном комплексе Cadence Orcad [4]. Верификация ПМ осуществляется путем сравнения основных электрических характеристик и параметров микросхемы в типовой схеме включения по основным характеристикам, приведенным в техническом описании приборов [5 – 9].

Существуют поведенческие модели интегральных микросхем, представленные в патентной документации и научных публикациях. Известны, реализованные на языке Spice, программные модели, разработанные ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», имитирующие поведение интегральных микросхем импульсных стабилизаторов напряжения [например, 10], а также созданная разработчиками ФГБОУ ВО «БГТУ» поведенческая модель ШИМ-контроллера [11]. Разработка поведенческих моделей на языке Spice для линейных стабилизаторов напряжения является актуальной задачей. В данной работе представлены этапы создания и верификации поведенческих моделей линейного стабилизатора отрицательного напряжения.

## Материалы, модели и методы

В настоящей работе основной целью было создание поведенческих моделей стабилизатора отрицательного напряжения MC79L в двух вариантах исполнения (регулируемое и фиксированное значение выходного напряжения) со следующими основными электрическими параметрами [5]:

опорное напряжение	$U_{\text{оп}} = -1,25 \text{ В};$
выходное напряжение	$U_{\text{вых}} = -3,3 \text{ В}$ (фиксированное), $U_{\text{вых}} = -1,25 \text{ В}$ ( $U_{\text{оп}}$ ) ÷ -20 В (регулируемый);
минимальное напряжение питания	$U_{\text{пит}} = -30 \text{ В};$
ток потребления	$I_{\text{пот}} = 15 \text{ мА};$
максимальная рассеиваемая мощность	$P_{\text{рас}} = 5 \text{ Вт};$
минимальное падение напряжения, типовое значение	$U_{\text{ПДmin}} = 2 \text{ В}.$

Ближайшими функциональными аналогами этой микросхемы являются микросхемы LM337L, LT1964, LT3032, а также микросхемы 5348EP025 (регулируемый вариант выходного напряжения) и 5348EM025 (фиксированный вариант выходного напряжения) производства АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» [9].

Основываясь на данных технического описания микросхем линейных стабилизаторов, осуществлялся поиск и разработка оптимальных структур схем замещения поведенческих моделей.

Функциональные схемы микросхем линейных стабилизаторов отрицательного напряжения представлены на рис. 1. В табл. 1 представлено назначение выводов микросхемы.

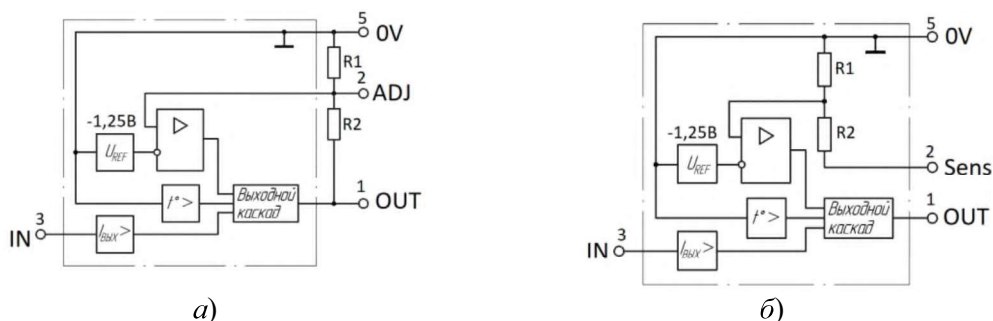


Рис. 1. Схема электрическая функциональная микросхем стабилизаторов MC79L:

*a* – для регулируемого варианта; *б* – для нерегулируемого варианта

**Fig. 1. Electrical functional circuit of MC79L regulator IC:**

*a* – for the adjustable option; *b* – for the unregulated option

Таблица 1

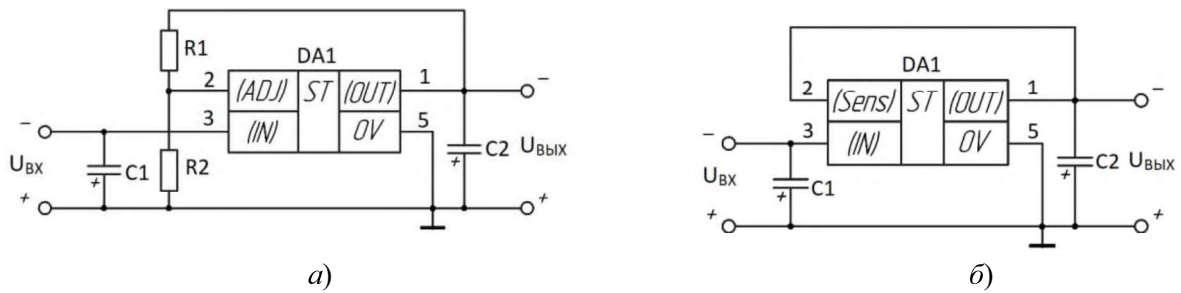
### Назначение выводов микросхемы MC79L

Table 1

#### The purpose of the pins of the MC79L chip

Номер вывода	Назначение вывода	Рисунок
1	Выход, (OUT)	<i>a, б</i>
2	Вход регулировки обратной связи, (ADJ)	<i>a</i>
	Вход обратной связи, (Sens)	<i>б</i>
3	Вход, (IN)	<i>a, б</i>
4	Свободный, NC	<i>a, б</i>
5	Общий вывод, 0V	<i>a, б</i>

Типовые схемы включения микросхемы линейного стабилизатора показаны на рис. 2.



**Рис. 2. Типовая схема включения микросхемы MC79L:**

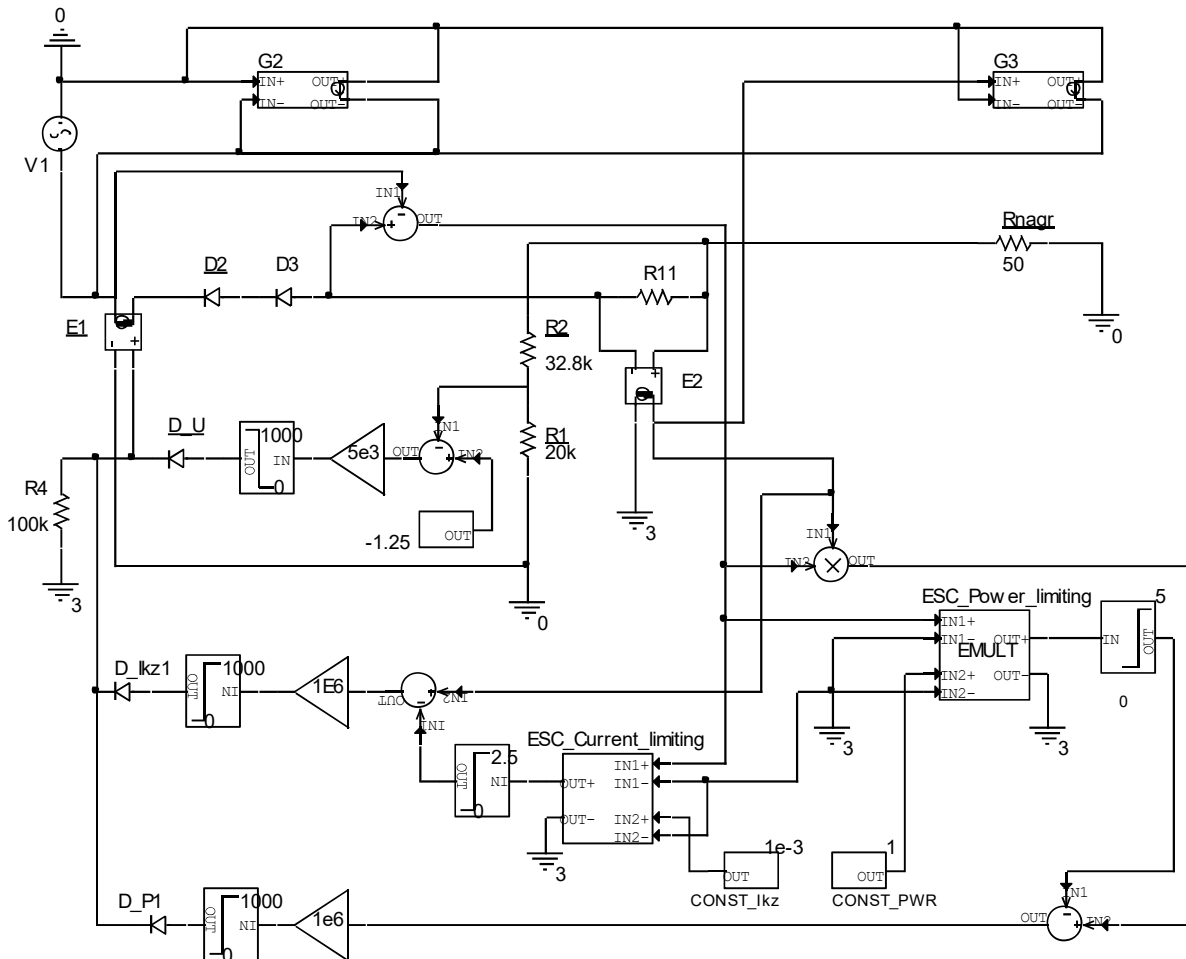
*a* – для регулируемого выходного напряжения; *б* – для фиксированного выходного напряжения

**Fig. 2. Typical circuit of the MC79L IC:**

*a* – for adjustable output voltage; *b* – for fixed output voltage

На основе типовой функциональной схемы линейного стабилизатора [12], с учетом функциональных (см. рис. 1) и типовых схем включения ИМС (см. рис. 2), разработаны схемы замещения поведенческих моделей для двух вариантов исполнений стабилизатора: с фиксированным значением выходного напряжения и регулируемым значением выходного напряжения.

Схема замещения поведенческой модели ИМС MC79L с фиксированным выходным напряжением представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Схема замещения поведенческой модели ИМС MC79L с фиксированным выходным напряжением**

**Fig. 3. Substitution scheme of the MC79L IC behavioral model with a fixed output voltage**

Структура построена на базе стандартных математических блоков, на ограничителях, зависимых источниках и пассивных элементах. В структуре присутствуют элементы, моделирующие ток потребления микросхемы (*G2* и *G3*), обратные связи по выходному напряжению (сигнал ОС по напряжению формируется делителем  $R_2$ - $R_1$ ), схема защиты по току и защита от короткого замыкания (построена на основе блока ESC Current limiting и его

обвязки), схема ограничения мощности (блок ESC Power limiting с обвязкой). Структура имитирует поведение линейного стабилизатора во временной области и в режиме работы по постоянному току, а ограничения прописаны внутри управляемых источников математическими соотношениями.

Для пользования моделью с целью разработки законченных электронных устройств, представленная на рис. 3 схема замещения была преобразована в схему (рис. 4), где модель микросхемы оформлена в виде отдельного компонента с описанием на языке Spice. Модель ИМС реализована на основе списка соединений схемы замещения поведенческой модели, а условно-графическое обозначение сформировано с помощью PSpiceModel Editor, входящего в программный комплекс OrCad.

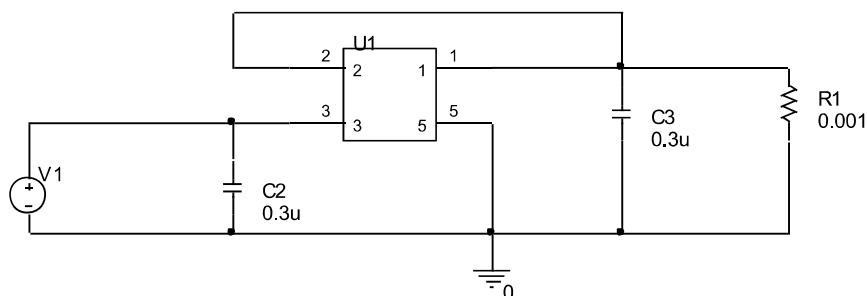


Рис. 4. Модель типовой схемы включения микросхемы MC79L с фиксированным выходным напряжением -3,3 В

*Fig. 4. Model of a typical MC79L IC t with a fixed output voltage of -3.3 V*

Схема замещения поведенческой модели для регулируемого случая выходного напряжения представлена на рис. 5. В схеме появились блоки, которые формируют задание на выходное напряжение согласно выражению  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ОП}} \cdot (1 + R1/R2)$ . На рис. 6 представлена модель типовой схемы включения регулируемого варианта стабилизатора.

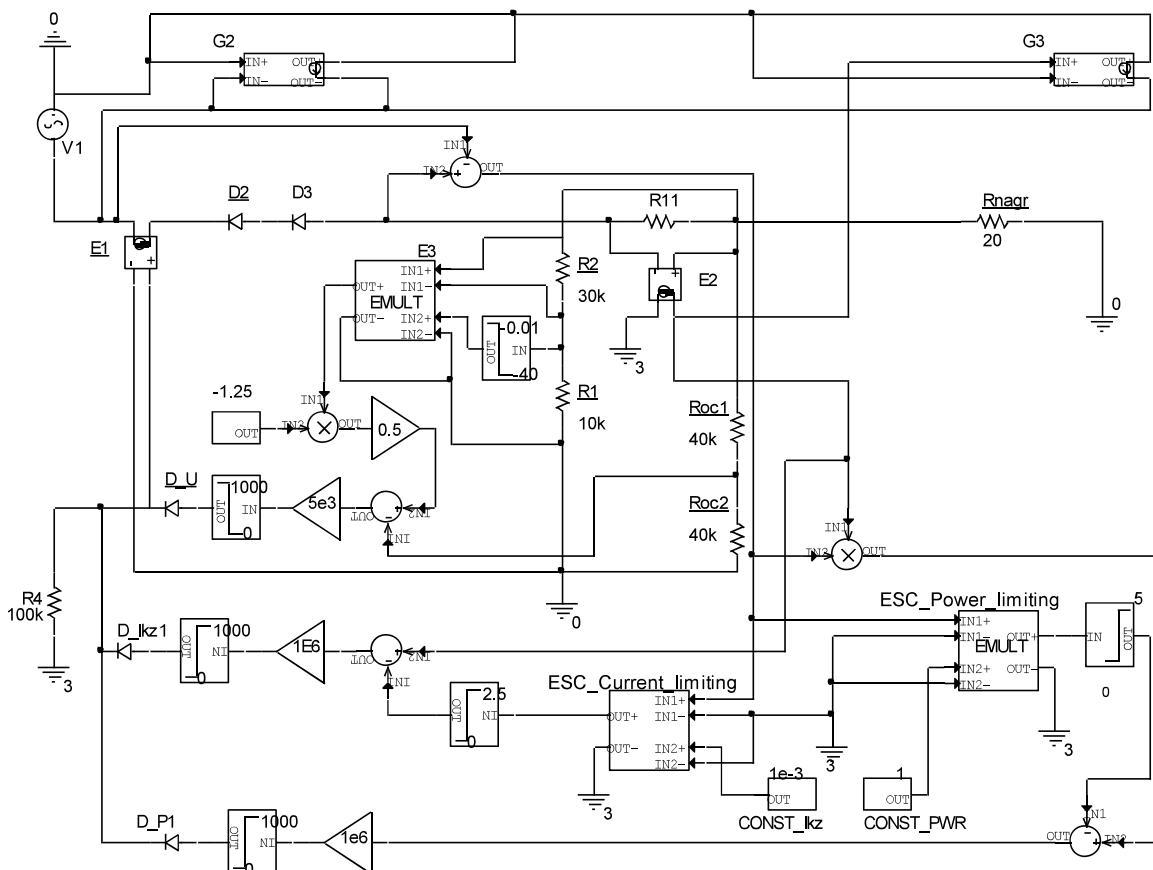
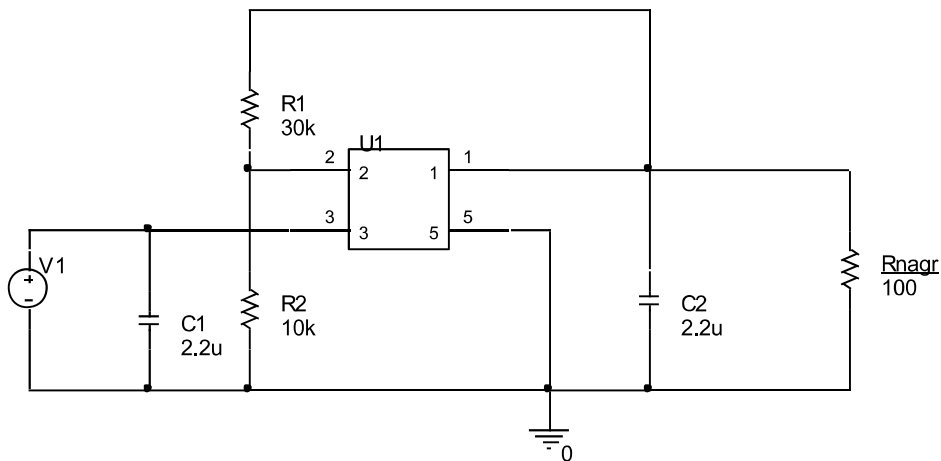


Рис. 5. Схема замещения поведенческой модели ИМС MC79L с регулируемым выходным напряжением

*Fig. 5. Substitution scheme of the MC79L IC behavioral model with adjustable output voltage*

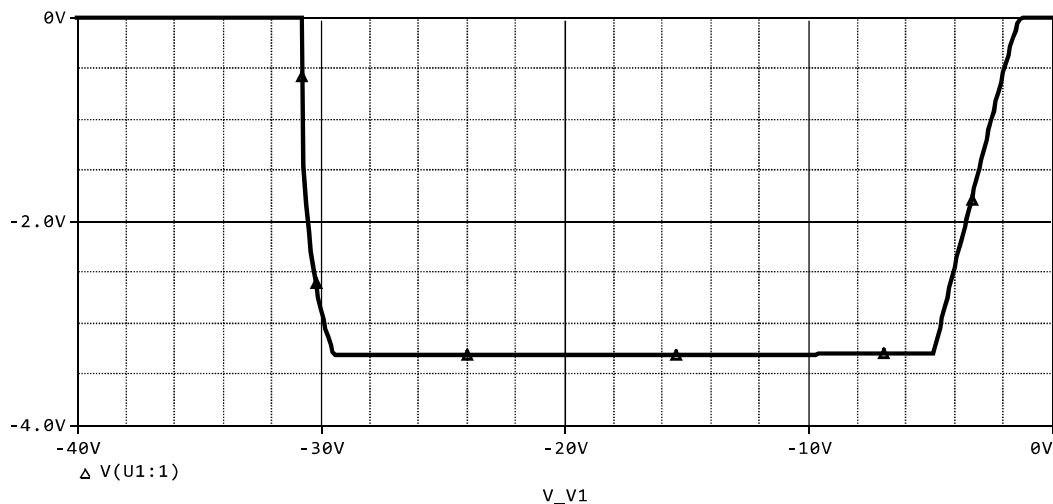


**Рис. 6. Модель типовой схемы включения микросхемы ИМС MC79L с регулируемым выходным напряжением**  
**Fig. 6. Model of a typical MC79L IC circuit with an adjustable output voltage**

### Результаты

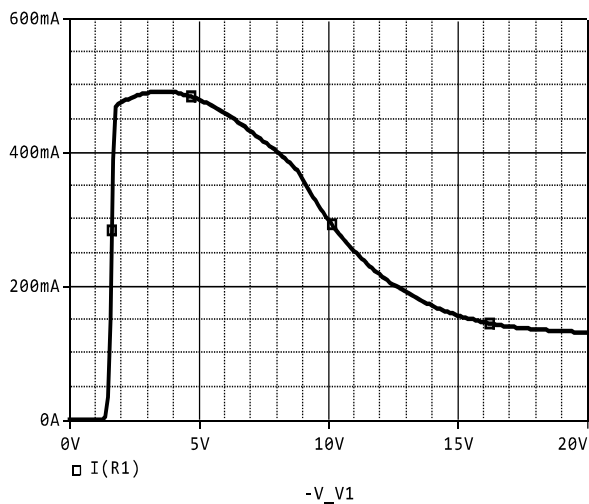
Верификация моделей проведена в сравнении с данными из технического описания микросхемы MC79L, а также микросхем аналогов. На рис. 7–11 представлена часть результатов моделирования работы ИМС в типовой схеме включения.

Так, на рис. 7 представлена зависимость выходного напряжения стабилизатора от входного, из которого видно, что в рабочем диапазоне входного напряжения напряжение на выходе поддерживается на уровне минус 3,3 В.

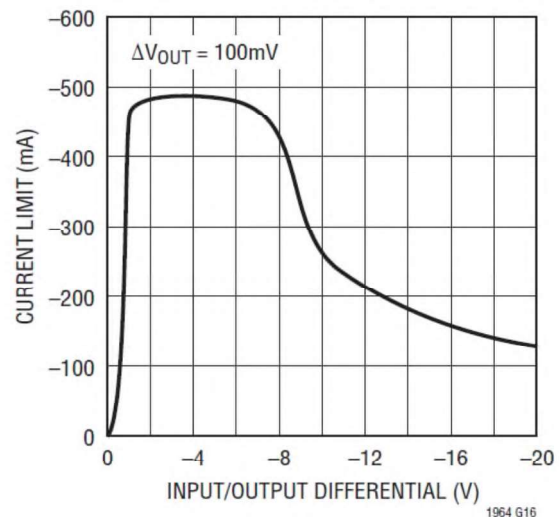


**Рис. 7. Выходное напряжение стабилизатора с фиксированным выходным напряжением при токе 100 мА**  
**Fig. 7. The output voltage of the stabilizer with a fixed output voltage at a current of 100 mA**

На рис. 8 представлена зависимость ограничения схемой тока короткого замыкания от напряжения. Диаграмма тока, отражающая результат моделирования достаточно хорошо повторяет данные из технического описания микросхемы аналога MC79L.



a)

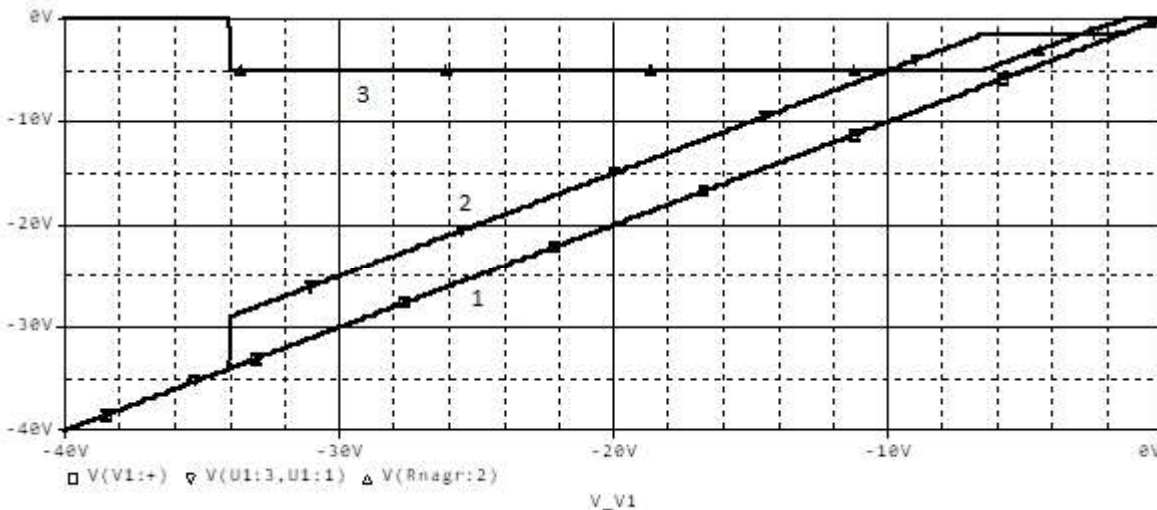


б)

**Рис. 8.** Результат сравнения критического тока модели линейного стабилизатора MC79L (a) и ИМС аналога [5] (б)

**Fig. 8.** The result of comparing the critical current of the MC79L linear regulator model (a) and the analog IC [5] (b)

Моделирование в среде OrCad позволяет проводить параметрический анализ работы приборов и устройств. На рис. 9 представлены результаты моделирования, отражающие напряжение на входе схемы, выходное напряжение стабилизатора, а также падение напряжения на стабилизаторе при сопротивлении нагрузки 100 Ом и отношении резисторов  $R1/R2 = 3$ .



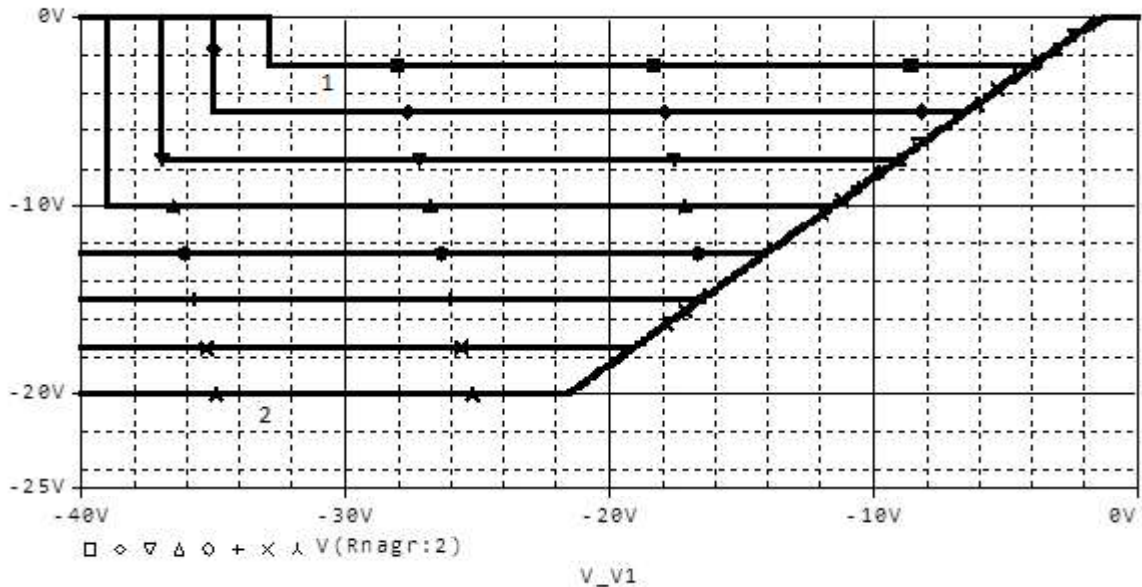
**Рис. 9.** Результаты измерений:

1 – изменение напряжения на входе схемы; 2 – падение напряжения на стабилизаторе; 3 – выходное напряжение стабилизатора

**Fig. 9.** Measurement results:

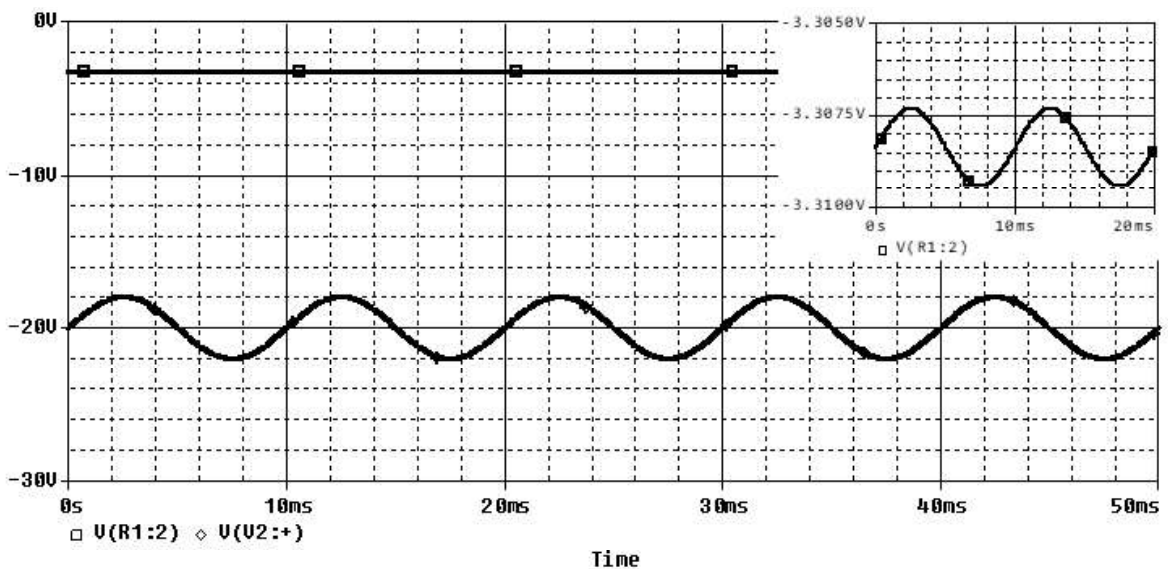
1 – voltage change at the input of the circuit; 2 – voltage drop on the regulator; 3 – regulator output voltage

На рис. 10 представлено семейство значений выходного напряжения линейного стабилизатора с регулируемым выходом. Данная диаграмма получена методом параметрического анализа по величине номинала резистора  $R1$ . Изменяя соотношение величин резисторов  $R1$  и  $R2$  получаем значения выходного напряжения согласно выражению  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ОП}} (1 + R1/R2)$  в пределах заданных характеристик микросхемы.



**Рис. 10. Семейство выходных напряжений стабилизатора с регулируемым выходным напряжением при сопротивлении нагрузки 200 Ом и соотношении резисторов R1/R2 от 1 (график 1) до 15 (график 2)**  
**Fig. 10. A family of output voltages of a regulator with an adjustable output voltage at a load resistance of 200 ohms and a ratio of resistors R1/R2 from 1 (graph 1) to 15 (graph 2)**

На рис. 11 представлена работа модели стабилизатора во временной области. На вход подается напряжение с постоянной составляющей 20 В и синусоидальной огибающей амплитудой 2 В, имитирующей нестабильность входного напряжения. На выходе нестабильность напряжения по амплитуде измеряется в тысячных долях вольта (увеличение масштаба представлено в правой части графика выходного напряжения), что подтверждает высокий коэффициент стабилизации ИМС, соответствующий техническим данным производителя.



**Рис. 11. Работа модели стабилизатора во временной области**  
**Fig. 11. Operation of the regulator model in the time domain**

Результаты моделирования работы модели стабилизатора во временной области и в режиме по постоянному току (DC sweep) подтверждают, что поведенческая модель воспроизводит электрические характеристики интегральной микросхемы MC79L и ее аналогов в типовых схемах включения, соответственно ее можно считать верифицированной.

## Заключение

Разработанные Spice-модели микросхемы позволяют стороннему разработчику электронных систем выполнять моделирование микросхем линейных стабилизаторов напряжения с заданными параметрами в составе более сложных электрических схем в САПР, ориентированном на язык Spice. Модели позволяют проводить исследование интегральных схем как во временной области, так и в режимах работы по постоянному току.

Достоинством поведенческих моделей, созданных на языке Spice, является их открытость и возможность модификации для исследования работы приборов при изменяющихся внешних воздействиях.

Поведенческая модель выполнена на базе стандартных математических блоков, на ограничителях, зависимых источниках и пассивных элементах, что позволяет ускорить моделирование по сравнению с моделями ИМС, выполненными на транзисторах.

Результаты верификации разработанной полезной модели микросхемы MC79L показывают, что поведенческая модель воспроизводит электрические характеристики реальной интегральной микросхемы MC79L и ее аналогов в типовой схеме включения.

### Список источников:

1. Andriyanov A.I. Parameters adaptation for target-oriented control of the buck converter // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Moscow: IEEE, 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. Буквин А. Линейные стабилизаторы в качестве фильтров в импульсных источниках питания // Компоненты и технологии. 2019. № 9(218). С. 16-17.
4. OrCAD | PCB Design Software and Schematic Editor [Электронный ресурс]. URL: <https://www.orcad.com> (дата обращения: 24.04.2023)
5. MC79L Linear Voltage Regulator, 100 mA, 5 V, Negative. URL: <https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/mc79l00-d.pdf> (дата обращения 24/04/2023)
6. LT1964. 200mA, Low Noise, Low Dropout Negative Micropower Regulator in ThinSOT. URL: <https://web.archive.org/web/20170316192751/http://cds.li-near.com/docs/en/datasheet/1964fb.pdf> (дата обращения: 24.04.2023).
7. LM337L 3-Terminal Adjustable Regulator datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/lm337l> (дата обращения 24.04.2022)
8. LT3032 Series - Dual 150mA Positive/Negative Low Noise. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3032ff.pdf> (дата обращения 24.04.2022)
9. Новые разработки 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://group-kremny.ru/katalog-izdeliy-elektronnoy-tekhniki/Новые%20разработки%202023.pdf> (дата обращения: 24.04.2023)
10. Программа для ЭВМ RU 2018616743. Программный модуль, имитирующий поведение интегральной микросхемы TL494 в различных режимах работы / Амелин С.А., Амелин А.С.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (RU). - 2018616743; заявл. 17.04.2018; опубл. 06.06.2018 – 1 с.

### References:

1. Andriyanov A.I. Parameters Adaptation for Target-Oriented Control of the Buck Converter. In: Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Moscow: IEEE; 2016. p. 1-6.
2. Andriyanov A.I. A Comparative Analysis of Efficiency of Nonlinear Dynamics Control Methods for a Buck Converter. In: Proceedings of the IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering; Institute of Physics Publishing; 2017. p. 1-9.
3. Bukvin A. Linear Stabilizers as Filters in Switching Power Supplies. Components and Technologies. 2019;9(218):16-17.
4. OrCAD | PCB Design Software and Schematic Editor [Internet] [cited 2023 Apr 24]. Available from: <https://www.orcad.com>
5. MC79L Linear Voltage Regulator, 100 mA, 5 V, Negative [Internet] [cited 2023 Apr 24]. Available from: <https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/mc79l00-d.pdf>
6. LT1964. 200mA, Low Noise, Low Dropout Negative Micropower Regulator in ThinSOT. [Internet] [cited 2023 Apr 24]. Available from: <https://web.archive.org/web/20170316192751/http://cds.li-near.com/docs/en/datasheet/1964fb.pdf>
7. LM337L 3-Terminal Adjustable Regulator Datasheet [Internet] [cited 2023 Apr 24]. Available from: <https://www.ti.com/lit/gpn/lm337l>
8. LT3032 Series – Dual 150mA Positive/Negative Low Noise. [Internet] [cited 2023 Apr 24]. Available from: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3032ff.pdf>
9. New Developments [Internet]. 2023 [cited 2023 Apr 24]. Available from: <https://group-kremny.ru/katalog-izdeliy-elektronnoy-tekhniki/New%20developments%202023.pdf>
10. Amelin S.A., Amelin A.S. Computer Programme RU 2018616743. Software Module Simulating the TL494 Integrated Circuit Behaviour in Various Operation Modes. Moscow Power Engineering Institute. 2018 Jun 06.



11. Школин А.Н. Разработка и тестирование поведенческой модели интегральной микросхемы 5340EU01x /С.В. Седых, А.Н. Школин // САПР и моделирование в современной электронике. Брянск. 2020 г. С. 252-256.

12. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. Изд 2-е. Издательство БИНОМ. 2014, 704 с.

11. Shkolin A.N., Sedykh S.V. Developing and Testing a Behavioural Model of 5340EU01x Integrated Circuit. In: CAD and Modelling in Modern Electronics. Bryansk; 2020. p. 252-256.

12. Horovitz P., Hill W. The Art of Electronics. 2nd edition. BINOM; 2014.

#### **Информация об авторах:**

##### **Малаханов Алексей Алексеевич**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета

##### **Малаханова Алла Григорьевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета

##### **Васильева Юлия Олеговна**

ведущий инженер научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии»

#### **Information about the authors:**

##### **Malakhanov Alexey Alekseevich**

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department “Electronic, Radioelectronic and Electrical Engineering Systems” of Bryansk State Technical University

##### **Malakhanova Alla Grigorievna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Automated Technological Systems” of Bryansk State Technical University

##### **Vasilyeva Yulia Olegovna**

Leading Engineer of the Research and Educational Design Centre “Power Electronics and Integrated Technologies”

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 03.07.2023; одобрена после рецензирования 20.08.2023; принята к публикации 25.08.2023.**

**The article was submitted 23.06.2023; approved after reviewing 20.08.2023; accepted for publication 25.08.2023.**

**Рецензент – Самохин С.П., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный инженерно-технологический университет.**

**Reviewer –Samokhin S.P., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technological University of Engineering.**