

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ БЕТАВОЛЬТАИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Земцов В.В.¹, Иващенко А.В.²

¹Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

²Самарский государственный медицинский университет, Самара, РФ

E-mail: zemtsov.fond@gmail.com

В статье предложена имитационная модель программно-конфигурируемого бетавольтаического комплекса, предназначенная для его проектирования и исследования в приложениях Интернета вещей. В качестве инструмента имитационного моделирования предложено использовать временные сети Петри. Приведен алгоритм работы бетавольтаического комплекса, принцип которого основан на программном управлении, реализуемый посредством использования программируемого микроконтроллера. В качестве одного из вариантов схемы реализации бетавольтаического комплекса предложена схема с блочно-функциональной структурой. В качестве программного средства для построения временной цветной сети Петри использован свободно распространяемый программный продукт CPN Tools версия 4.0.1. Для апробации модели был разработан испытательный стенд программно-конфигурируемого бетавольтаического комплекса. Логика управления микроконтроллера испытательного стенда была реализована на основе разработанной имитационной модели. Построенная имитационная модель позволяет проектировать и исследовать схему усиления и логику микроконтроллера для управления работой программно-конфигурируемого бетавольтаического комплекса, предназначенного для энергообеспечения слаботочных систем.

Ключевые слова: Сети Петри, Интернет вещей, бетавольтаический источник питания, бетавольтаический комплекс, имитационное моделирование

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений развития автономных источников энергии являются бетавольтаические электропреобразователи (БВЭП). Перспектива их практического применения обусловлена длительным периодом эксплуатации от 10 до 100 лет без необходимости замены или обслуживания. Кроме того, они способны выдерживать экстремально высокие и низкие температуры от -50 до 300°C, что дает возможность их использования в экстремальных условиях (в высокогорных районах, в условиях крайнего севера, в космосе и т.д.). Существующие экспериментальные образцы бетавольтаических источников питания ограничены своей выходной мощностью, не превышающей 50 мкВт [1; 2].

Физический принцип работы БВЭП схож с принципом работы фотовольтаических источников питания. Отличие заключается в том, что в случае с БВЭП происходит преобразование энергии радиохимического бета-распада элементов в электрическую форму. Решением проблемы ограничения мощности БВЭП и возможности их коммерческого использования может стать разработка программно-конфигурируемых бетавольтаических комплексов (БВК). Одним из этапов разработки программно-конфигурируемых БВК

является построение его имитационной модели, позволяющей оценить и исследовать технико-эксплуатационные характеристики. В данной статье рассматривается вариант решения задачи имитационного моделирования программно-конфигурируемых БВК с использованием временных цветных сетей Петри.

Постановка задачи

Программно-конфигурируемый БВК представляет собой устройство для питания слаботочных систем. В основе комплекса лежит БВЭП, сопряженный с заряжаемыми ионисторами, процессы заряда и разряда которых контролируются микроконтроллером.

БВК обеспечивает следующие основные функциональные возможности:

- выполнение функций генератора электрического тока путем преобразования энергии радиохимического бета-распада в электрическую;
- накопление энергии для импульсных нагрузочных и сенсорных преобразователей;
- переключение между генераторами электрического тока (пары БВЭП-ионистор) при достижении порогового значения напряжения посредством управляющего программного обеспечения.

Алгоритм работы БВК, принцип которого основан на программном управлении, реализуется

с помощью программируемого микроконтроллера. Для моделирования работы микроконтроллера БВК необходимо описать принцип работы и алгоритм управляющего воздействия на бета-вольтаические сборки, представляющие собой пары БВЭП-ионистор, по мере достижения ими порогового значения (по накоплению заряда).

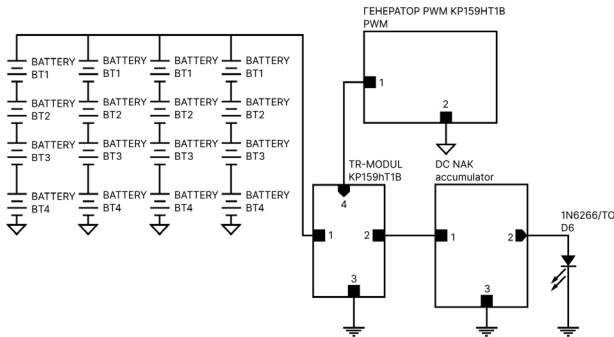


Рисунок 1. Вариант структуры блочно-функциональной схемы DC-DC преобразователя

В качестве одного из вариантов схемы реализации БВК была рассмотрена схема с блочно-функциональной структурой (рисунок 1): слева – входные генераторы, представляющие собой пары БВЭП-ионистор (приведен пример смешанного соединения 4x4), в центре DC-DC преобразователь с генератором управляющим, который изображен сверху на рисунке отдельным блоком, справа – накопитель. В приведенной схеме используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ или pulse-width modulation (PWM)) для преобразования сигналов от импульсных источников питания.

При моделировании работы БВК необходимо учитывать следующие аспекты.

Характер электрической нагрузки БВК может быть импульсным или непрерывным с учетом назначения пар электрических выводов. Времен-

ные характеристики заряда-разряда ионистора от БВЭП и вольт-амперные характеристики (ВАХ) приведены на рисунках 2 и 3.

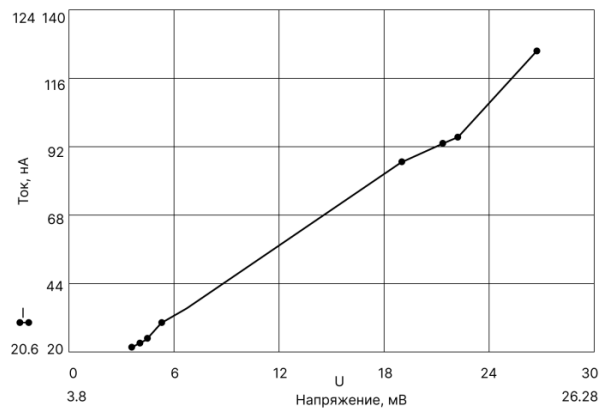


Рисунок 3. Вольт-амперная характеристика заряженного ионистора от БВЭП

За время t ионистор емкостью C , подключенный последовательно с резистором R заряжается ориентировочно до $2/3$ (63,2%) напряжения питания. За время $5t$ ионистор заряжается до значения очень близкого к напряжению питания (99,3%). Такие интервалы обусловлены тем, что процесс зарядки ионистора является экспоненциальным. Для определения его параметров можно использовать следующие формулы [3]:

$$Q = C \times V_0 \times \left(1 - e^{-\frac{t}{R \times C}}\right); \quad (1)$$

$$V = V_0 \times \left(1 - e^{-\frac{t}{R \times C}}\right); \quad (2)$$

$$I = \frac{V_0}{R} \times e^{-\frac{t}{R \times C}}, \quad (3)$$

где Q – мгновенный заряд, в момент t [Кл];

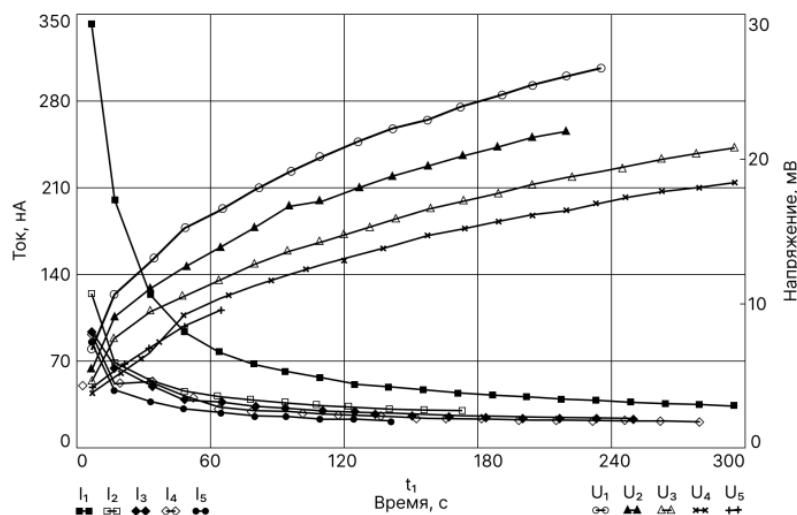


Рисунок 2. Временные характеристики $I(t)$ «разряда» и $U(t)$ «заряда» ионистора от БВЭП (ток нА, напряжение мВ, время выражено в секундах)

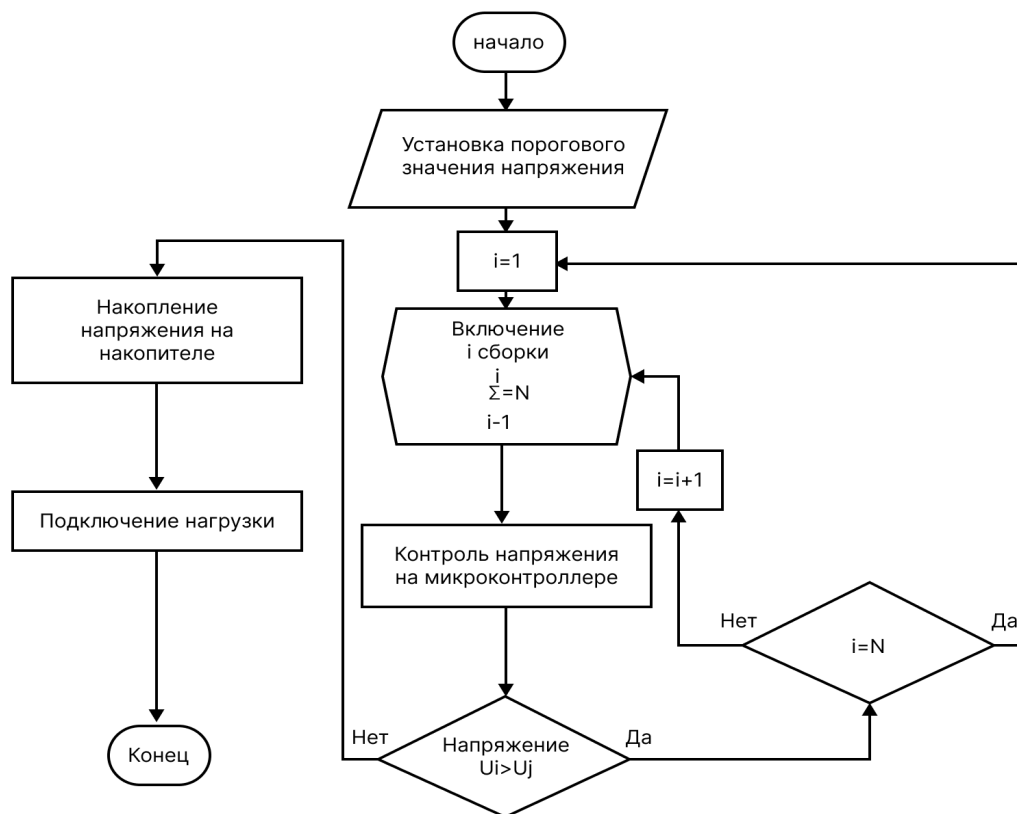


Рисунок 4. Алгоритм работы БВК, состоящий из 2 пар БВЭП-ионистор

C – емкость конденсатора [Ф];

I – мгновенный зарядный ток [А];

V_0 – напряжение зарядки [В];

V – мгновенное напряжение на ионисторе [В];

R – сопротивление, подключенное последовательно с ионисторами [Ом];

t – время [с].

Непрерывный режим работы БВК должен предполагать последовательное программное подключение выводов по циклическому закону по мере половинного разряда емкости ионистора, выступающего в роли накопителя.

Для проектирования схемы усиления и программирования логических операций необходимо разработать модель функционирования схемотехнических решений. При этом логика БВК напрямую зависит от скорости-заряда разряда ионистора (и определяет их количество на цепочку БВЭП).

Моделирование алгоритма работы бетавольтаического комплекса

Для решения поставленной задачи было проведено имитационное моделирование алгоритмов работы БВК. Для имитационного моделирования циклов работы БВК и переключения между парами БВЭПионистор использовались сети Петри.

Сети Петри [4; 5] являются математическими объектами и не зависят от физической ин-

терпретации. Их графическое представление может эффективно использоваться в качестве средств моделирования устройств логического управления.

Алгоритм работы БВК можно представить в виде, показанном на рисунке 4.

Через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) данные о напряжении работающей i -ой пары БВЭП-ионистор передаются на микроконтроллер, где сравниваются установленное пороговое значение напряжения (U_j) и текущее значение напряжения работающей пары БВЭП-ионистор (U_i).

При условии, что $U_i > U_j$, происходит переключение на следующую пару БВЭП-ионистор в ряду N , задействованных в работе:

$$\sum_{i=1}^i = N. \quad (4)$$

Если условие $U_i > U_j$ не выполняется, то продолжается накопление заряда на накопителе и отдача энергии на нагрузку. Если напряжение достигнуто, то происходит переключение на следующую сборку. При достижении последней сборки в ряду N , то есть $i = N$, происходит переключение на 1 сборку ($i = 1$), и цикл возобновляется.

Классическая сеть Петри задается в виде [6]:

$$C = (P, T, A, \mu), \quad (5)$$

где P – множество позиций, обозначаемых на графе кружками;

T – множество переходов, обозначаемых прямоугольниками;

A – множество дуг, соединяющих позиции с переходами;

$\mu(P)$ – маркировка сети, соответствующая распределению маркеров по позициям.

Формальное определение раскрашенной сети Петри (Colored Petri Net, CPN):

$$CPN = (P, T, A, C, V, S, G, E, I, \mu), \quad (6)$$

где P – множество позиций;

T – множество переходов;

$A \subset P \times T \cup T \times P$ – множество направленных дуг;

C – конечное непустое множество цветов;

V – конечное множество типов переменных цветов, таких что $Type[v] \in C$ для всех $v \in V$;

$S: P \rightarrow C$ – это функция набора цветов для каждой позиции;

$G: T \rightarrow EXPRT$ – функция условий, которая назначает условия для срабатывания каждому переходу так, что $Type[G(t)] = Bool$;

$E: A \rightarrow EXPRA$ – функция, которая присваивает каждой дуге некоторое выражение EXPRA;

$I: P \rightarrow EXPRp$ – функция инициализации, которая назначает выражение инициализации EXPRp каждой позиции p , такое, что $Type[I(p)] = C(p)$;

$\mu: P \rightarrow N$ – маркировка сети, задающая количество фишек (маркеров) в позициях.

Временная цветная сеть Петри TCPN является расширением раскрашенной сети Петри:

$$TCPN = (CPN, \Theta 1, \Theta 2, \Theta 3), \quad (7)$$

где CPN – основная раскрашенная сеть Петри;

$\Theta 1, \Theta 2, \Theta 3$ – временные задержки, приписанные местам, дугам и переходам сети соответственно.

Для построения имитационной модели схемы усиления была выбрана временная цветная сеть Петри TCPN. Ключевым преимуществом использования временной цветной сети Петри является возможность включения временных параметров в явном виде.

В качестве программного средства для построения временной цветной сети Петри был использован свободно распространяемый программный продукт CPN Tools версия 4.0.1 [7; 8].

Имитационная модель работы БВК (рисунков 5) представляет собой ориентированный граф с вершинами двух типов – позиции и переходы.

В составном цвете (colset) задаются ID (var id: ID), Name (var name: Name), CHr (var ch: CHr) Colset CHr – представляет собой число допустимых циклов разряда через переход charge. В позиции counter идет подсчет текущего значения циклов разряда.

В таблице 1 и 2 представлено описание переходов и позиций в имитационной модели работы БВК.

Реализованный инструментарий в CPN Tools позволяет задавать логические условия срабатывания переходов.

При моделировании логических контроллеров интерпретация входных и выходных сигналов микроконтроллера осуществляется в терминах

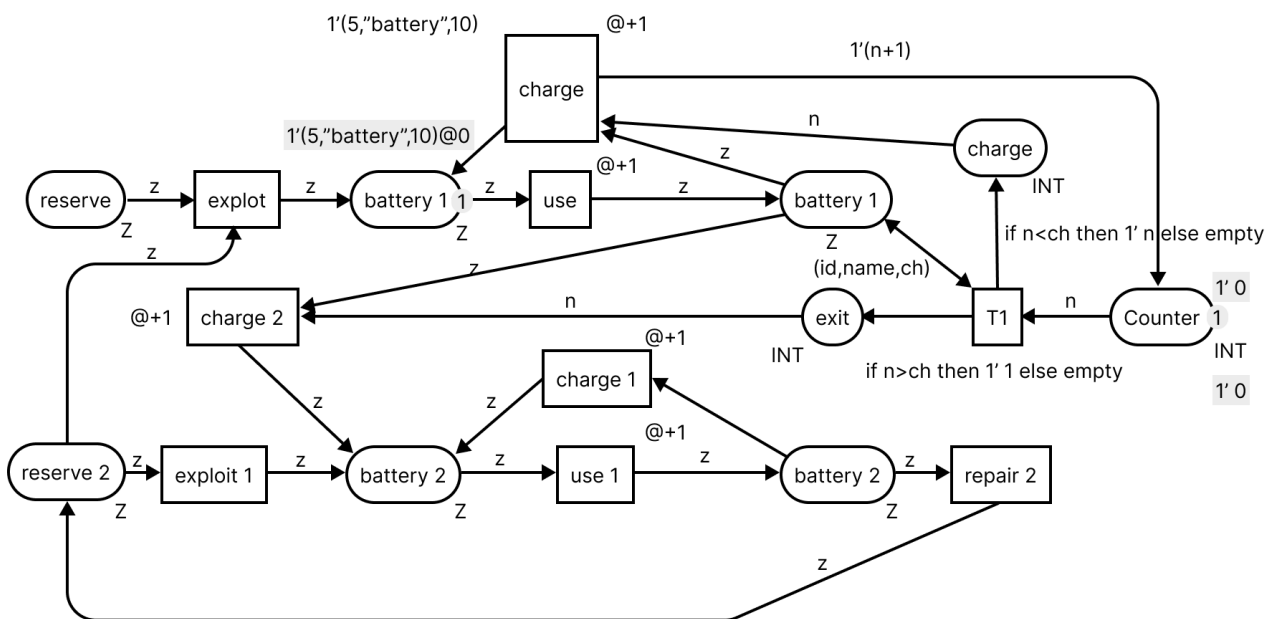


Рисунок 5. Имитационная модель работы БВК, реализованная в виде раскрашенной сети в CPN Tools

моделирующей системы. В частности, необходимо задавать условия выбора между контролирующими переходами, то есть формировать логические условия их срабатывания [9].

Таким образом, переход T1 выбирает один из путей по условному выражению на его выходных дугах: текущее число циклов разряда (n) < допустимого количества циклов разряда (ch), далее 1-ая пара БВЭП-ионистор (battery 1) работает, при $n \geq 10$ маркер идет в позицию exit и 1 пара БВЭП-ионистор из позиции battery1 уходит в переход change и появляется в позиции battery 2, то есть начинается эксплуатация 2-ой пары БВЭП-ионистор.

Чтобы условие срабатывало, необходимо от позиции battery1 провести дугу с переменной z , но раскрытой со всеми компонентами Colset. Тогда условие извлекает значение допустимого CНг для анализа.

Таблица 1. Интерпретация переходов в имитационной модели работы БВК

Переход	Значение
exploit	1-я пара БВЭП-ионистор вводится в эксплуатацию из начальной позиции
exploit 1	2-я пара БВЭП-ионистор вводится в эксплуатацию из начальной позиции
charge	Переход 1-ой пары БВЭП-ионистор в позицию готовности к эксплуатации
change 2	Ввод 2 пары БВЭП-ионистор в эксплуатацию на замену заряжающемуся ионистору 2-ой пары БВЭП-ионистор
use	Эксплуатация 1-ой пары БВЭП-ионистор
use 1	Эксплуатация 2-ой пары БВЭП-ионистор
T1	Переход 1-ой пары БВЭП-ионистор в позицию зарядки при достижении порогового значения по напряжению (при достижении предельного числа циклов в позиции Counter). Срабатывает при достижении порогового значения n , соответствующего количеству циклов эксплуатации пары БВЭП-ионистор, после которого достигается минимальный порог по напряжению
repair 2	Переход 2-ой пары БВЭП-ионистор в позицию зарядки

Таблица 2. Интерпретация позиций в имитационной модели работы БВК

Позиция	Значение
reserve 1	Начальная позиция 1-ой пары БВЭП-ионистор (не эксплуатируется)
reserve 2	Начальная позиция 2-ой пары БВЭП-ионистор (не эксплуатируется)
battery 1	Готовность 1-ой пары БВЭП-ионистор к эксплуатации
battery 2	Готовность 2-ой пары БВЭП-ионистор к эксплуатации
charge	Зарядка ионистора в 1-ой паре БВЭП-ионистор
charge 2	Зарядка ионистора во 2-ой паре БВЭП-ионистор
exit	Вывод пары БВЭП-ионистор на зарядку ионистора
counter	Счетчик разряда пары БВЭП-ионистор (счетчик циклов)

Также при построении модели учитывалось, чтобы пара БВЭП-ионистор должна оставаться в позиции battery 1 при срабатывании перехода T1. Для этого между ними ставится двунаправленная стрелка.

Результаты и выводы

Для апробации модели был разработан испытательный стенд программно-конфигурируемого БВК. Логика управления микроконтроллера испытательного стенда БВК была реализована на основе разработанной имитационной модели.

Графический интерфейс программного обеспечения испытательного стенда программно-конфигурируемого БВК (рисунок 6) предназначен для контроля и управления ключевыми параметрами работы пар БВЭП-ионистор. Графический интерфейс позволяет задавать параметры преобразования и управлять порядком переключения БВЭП-ионистора, обеспечивает измерение напряжения в ключевых точках схемы преобразования и дальнейшее отображение измеренных значений на экране ПК. Более подробно возможности программного обеспечения стенда описаны в [10, 11].

В качестве нагрузки использовалось мало-мощное устройство, светодиод со свечением красного цвета, позволяющее визуально оценить работоспособность системы.

При проведении испытаний, алгоритм, реализованный на основе разработанной имитационной модели, показал потенциал реализуемости на практике.

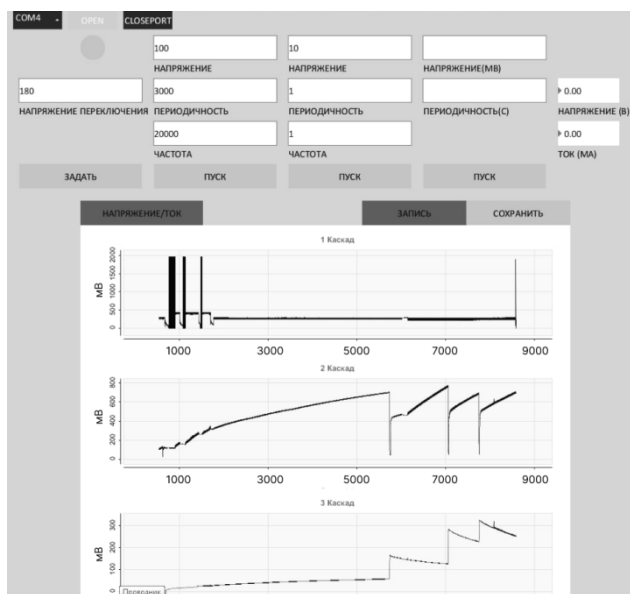


Рисунок 6. Графический интерфейс программного обеспечения, показывающего зарядовое состояние каскада ионисторов

Это дает основания считать возможным использование предложенного подхода для проектирования программно-конфигурируемых БВК в целях решения прикладных задач обеспечения питания маломощных устройств IoT в составе телекоммуникационных сетей.

Заключение

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о целесообразности использования временных цветных сетей Петри в качестве имитационной модели работы БВК на основе программируемого логического микроконтроллера. Таким образом, предложенный подход можно рассматривать как case-модель для разработки управляющего программного обеспечения микроконтроллера, что позволяет проектировать схему усиления и логику работы микроконтроллера для управления работой программно-конфигурируемого БВК в целях решения проблемы накопления и передачи энергии и обеспечения энергообеспечения устройств Интернета вещей малой мощности.

Литература

1. Краснов А.А., Леготин С.А. Достижения в области разработки бетавольтаических источников питания (обзор) // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 5–22. DOI: 10.31857/S0032816220040151

2. Бета-преобразователь на C-14 в структуре p-SiC/Si / А.В. Гурская [и др.] // «Наноструктурные материалы 2016»: Беларусь – Россия – Украина (НАНО-2016): материалы V Международной научной конференции. Минск, 2016. С. 395397.
3. Лелюхин А.С., Пискарева Т.И., Анисина И.Н. Изучение процессов заряда и разряда конденсатора: методические указания. Оренбург: ОГУ, 2019. 19 с.
4. Проститенко О.В., Халимон В.И., Рогов А.Ю. Моделирование дискретных систем на основе сетей Петри: учебное пособие. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2017. 73 с.
5. Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств / С.В. Сусарев [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 58 (84). С. 98104. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-58-84-98-104
6. Jensen K., Kristensen M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. 382 p.
7. Зайцев Д.А., Шмелева Т.Р. Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools: учебное пособие. Одесса: Онат, 2006. 60 с.
8. CPN tools. Modeling with coloured Petri nets. URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (дата обращения: 20.12.2024).
9. Венгжин А., Короткевич А.Г. Использование раскрашенных сетей Петри для моделирования и верификации параллельных устройств логического управления // Радиоэлектроника и информатика. 2000. № 4. С. 7074.
10. Земцов В.В., Иващенко А.В. Программно-конфигурируемое управление электропитанием телекоммуникационного оборудования малой мощности // Надежность и качество: труды Международного симпозиума. Пенза, 2023. Т. 2. С. 164–166.
11. Орлов С.П., Сусарев С.В. Имитационные модели на сетях Петри для анализа процессов обслуживания и ремонта сложных технических систем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30, № 4. С. 49–75. DOI: 10.14498/tech.2022.4.4

Дата поступления 28.10.2024

Дата принятия 29.11.2024

Земцов Владимир Владимирович, аспирант кафедры вычислительной техники Самарского государственного технического университета. 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 846 337-12-86. E-mail: zemtsov.fond@gmail.com

Иващенко Антон Владимирович, д.т.н., профессор, директор Передовой медицинской инженерной школы Самарского государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации. 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Чапаевская, 89. Тел. +7 846 374-10-03. E-mail: anton.ivashenko@gmail.com

UDC 007.52

DOI: 10.18469/ikt.2024.22.4.08

USE OF THE TEMPORARY COLOURED PETRY NETS FOR BETA VOLTAIC COMPLEX SIMULATION

Zemtsov V.V.¹, Ivaschenko A.V.²

¹*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation*

²*Samara State Medical University, Samara, Russian Federation*

E-mail: zemtsov.fond@gmail.com

The paper presents a simulation model of a software-defined betavoltaic complex, intended for its design and research in Internet of Things applications. It is proposed to use temporary Petri nets as a simulation tool. An algorithm of a betavoltaic complex operation, which principle is based on program control implemented through a programmable microcontroller, is presented. As one of the options for betavoltaic complex implementation, a circuit with a block-functional structure, is proposed. The freely distributed software product CPN Tools version 4.0.1 was used as a software tool for constructing a temporary colored Petri net. In order to test the model, a software-configurable betavoltaic complex test bench was developed. The control logic of the microcontroller of the test bench was implemented based on the developed simulation model. The created simulation model allows to design and study the amplification circuit and microcontroller logic to control the operation of a software-configurable betavoltaic complex intended for power supply of low-power systems.

Keywords: *Petri nets, Internet of Things, betavoltaic power supply, betavoltaic complex, simulation modeling*

Zemtsov Vladimir Vladimirovich, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; PhD Student of Computer Science Department. Tel. +7 846 337-12-86. E-mail: zemtsov.fond@gmail.com

Ivaschenko Anton Vladimirovich, Samara State Medical University, 89, Chapayevskaya Street, Samara, 443086, Russian Federation; Director of the Higher School of Medical Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 846 374-10-03. E-mail: anton.ivashenko@gmail.com

References

1. Krasnov A.A., Legotin S.A. Achievements in the development of betavoltaic power supplies (review). *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2020, no. 4, pp. 5–22. DOI: 10.31857/S0032816220040151 (In Russ.)
2. Gurskaya A.V. et al. Beta-converter on C-14 in the por-SiC/Si structure. «*Nanostrukturnye materialy – 2016*»: Belarus' – Rossiya – Ukraina (NANO-2016): materialy V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Minsk, 2016, pp. 395397. (In Russ.)
3. Lelyukhin A.S., Piskareva T.I., Anisina I.N. *Studying the Processes of Charging and Discharging a Capacitor*: Guidelines. Orenburg: OGU, 2019, 19 p. (In Russ.)
4. Prostitenko O.V., Khalimon V.I., Rogov A.Yu. *Modeling of Discrete Systems Based on Petri Nets*: Textbook. Saint Petersburg: SPbGTI (TU), 2017, 73 p. (In Russ.)

5. Susarev S.V. et al. Application of models on Petri nets in organizing the maintenance of autonomous agricultural vehicles. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, no. 58 (84), pp. 98104. (In Russ.)
6. Jensen K., Kristensen M. *Colored Petri Nets: Modeling and Validation of Concurrent Systems*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009, 382 p.
7. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. *Modeling Telecommunication Systems in CPN Tools: Textbook*. Odessa: Onat, 2006, 60 p. (In Russ.)
8. CPN tools. Modeling with colored Petri nets. URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (accessed: 20.12.2024).
9. Wengzhin A., Korotkevich A.G. Using colored Petri nets for modeling and verification of parallel logic control devices. *Radioelektronika i informatika*, 2000, no. 4, pp. 7074. (In Russ.)
10. Zemtsov V.V., Ivashchenko A.V. Software-defined power management of low-power telecommunications equipment. *Nadezhnost' i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma*. Penza, 2023, vol. 2, pp. 164–166. (In Russ.)
11. Orlov S.P., Susarev S.V. Simulation models based on Petri nets for the analysis of maintenance and repair processes of complex technical systems. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2022, vol. 30, no. 4, pp. 49–75. DOI: 10.14498/tech.2022.4.4 (In Russ.)

Received 28.10.2024

Accepted 29.11.2024

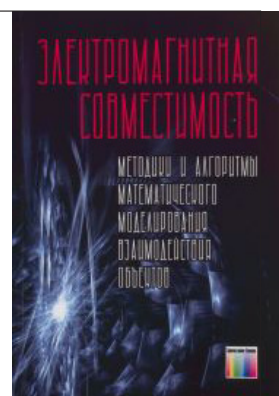
Реклама

Клюев, Д.С.

Электромагнитная совместимость. Методики и алгоритмы математического моделирования взаимодействия объектов / А.Н. Дементьев, Д.С. Клюев, А.В. Рагуткин, А.Н. Новиков. – М.: Горячая линия - Телеком, 2022. – 115 с.

ISBN 978-5-9912-1003-4

УДК 629.78.05:621.391.82



В монографии рассмотрены методики и разработанные на их основе алгоритмы проведения математического моделирования взаимодействия бортовой кабельной сети (БКС) и бортовой аппаратуры (БА) объекта ракетно-космической техники для оценки их электромагнитной совместимости. Предложенные методики позволяют рассчитать с учетом всех ослаблений напряжения степень влияния проводов БКС друг на друга через индуктивную и емкостную связи, бортовой аппаратуры на БКС, а также напряженности электромагнитного поля, генерируемые БКС и БА в заданных точках объекта. Полученные суммарные значения напряженности электрического поля в заданных точках и напряжения, наведенного на провода БКС, позволяют сделать вывод об электромагнитной совместимости БА и БКС объекта. В книге представлено детальное изложение разработанного математического аппарата в виде комплекса методик и алгоритмов для проведения математического моделирования взаимодействия БА объекта.

Монография предназначена для специалистов – научных работников и инженеров-разработчиков, связанных с проведением расчетов объектов со сложной радиоэлектронной архитектурой, будет полезна аспирантам и студентам, обучающимся по специальностям, связанным с радиоэлектроникой.