

---

УДК 621.314:681.511

М.В. БАРАНЧИКОВ, студент гр. О-20-ЭиН-пэ-М (БГТУ)  
Научный руководитель А.И. АНДРИЯНОВ, к.т.н., доцент (БГТУ)  
г. Брянск

### **ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Стабилизированные преобразователи постоянного напряжения с обратной связью по напряжению широко распространены в силовой электронике. Такие преобразователи имеют высокий коэффициент полезного действия и малые массогабаритные показатели. В то же время, они относятся к классу нелинейных динамических систем, где может возникать широкий спектр различных нелинейных явлений, которые приводят к аварийным режимам работы [1–8]. Для исключения нежелательных динамических режимов применяют специальные методы управления, одним из которых является метод OGY (метод линеаризации отображения Пуанкаре), названный по первым буквам фамилий предложивших его исследователей (Отта, Гребоджи, Йорке) [9–13]. Идея данного метода заключается в стабилизации неустойчивого периодического решения хаотической системы путем применения дискретных управляющих воздействий, которые вычисляются на основе линеаризованного отображения Пуанкаре в малой окрестности неподвижной точки желаемого режима (1-цикла). Для реализации этого метода необходимо вычислить: координаты неподвижной точки 1-цикла, матрицы линеаризованной системы, собственные значения матрицы монодромии, что является нетривиальной задачей.

Лабораторный стенд для исследования алгоритмов управления нелинейными динамическими процессами содержит: маломощные физические модели импульсных преобразователей напряжения на базе операционных усилителей, которые с достаточной точностью повторяют динамику реального устройства; цифровые потенциометры, с помощью которых устанавливается заданный коэффициент согласования; 16-битные аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

В связи с тем, что метод OGY предъявляет серьезные требования к вычислительным ресурсам системы управления, применение микроконтроллеров для ее реализации затруднительно. Поэтому было принято решение использовать одноплатный компьютер BeagleBone Black. Данное устройство построено на основе системы-на-кристалле AM3358 фирмы Texas Instruments. Главной особенностью рассматриваемой системы-на-

кристалле является наличие одного ядра ARM (Advanced RISC Machine) с тактовой частотой 1 ГГц и двух ядер PRU (Programmable Real-Time Unit) с тактовой частотой 200 МГц. Каждое из PRU-ядер оснащено одним модулем eCAP, который способен реализовывать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). PRU-ядра и ядро ARM имеет совместный доступ к специальной области памяти, с помощью которой можно производить обмен данными.

В предлагаемом стенде PRU-ядро решает задачи опроса АЦП и генерации сигналов ШИМ, а ядро ARM выполняет вычислительные задачи.

На рис. 1 представлен упрощенный алгоритм управления импульсным преобразователем постоянного напряжения, базирующийся на методе OGY.

В начале каждого тактового интервала PRU-ядро опрашивает АЦП и помещает полученные значения тока и напряжения в область общей памяти. ARM-ядро на основе этих данных производит расчет корректирующего воздействия по выбранному управляющему параметру системы. В данной работе в качестве управляющего параметра использовался коэффициент усиления пропорционального регулятора.

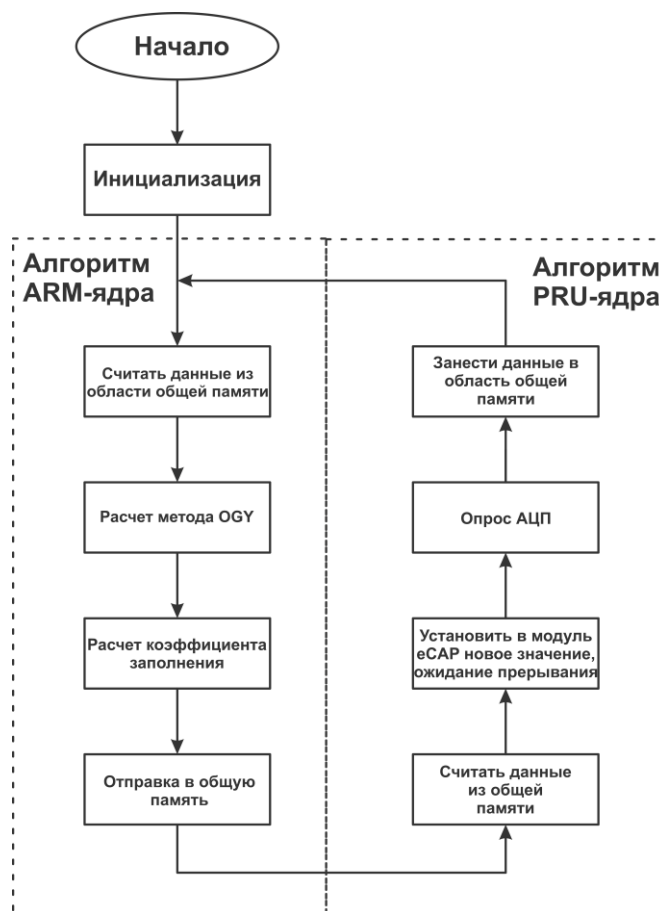


Рис. 1. Алгоритм управления одноплатного компьютера

После получения данных с датчиков, ARM-ядро рассчитывает возмущение управляющего параметра системы, реализует функцию регулятора и вычисляет требуемое на текущем тактовом интервале значение регистра сравнения CAP. После расчета, ARM-ядро отправляет полученное значение в область общей памяти, что позволяет ядру PRU сгенерировать на текущем тактовом интервале импульс управления с заданной шириной.

Подобный подход позволяет обеспечивать работу преобразователя в желаемом динамическом режиме при изменении его параметров в широком диапазоне.

На рис. 2 представлены результаты исследования замкнутой системы автоматического управления непосредственным понижающим преобразователем напряжения, работающей на основе метода OGY. Исследование проводилось при следующих параметрах системы: индуктивность дросселя фильтра  $L = 4,535$  мГн, активное сопротивление дросселя фильтра  $R = 0,102$  Ом, емкость конденсатора фильтра  $C = 3,254$  мкФ, сопротивление нагрузки  $R_n = 15,34$  Ом, коэффициент усиления цепи обратной связи  $\beta = 0,823$ , задающее напряжение системы управления  $U_z = 3$  В, амплитуда пилообразного развертывающего напряжения  $U_{гн} = 5$  В, частота ШИМ  $f = 10$  кГц.

Как видно из рисунка, после активации метода OGY система переходит в желаемый динамический режим (1-цикл) с малой амплитудой пульсаций.

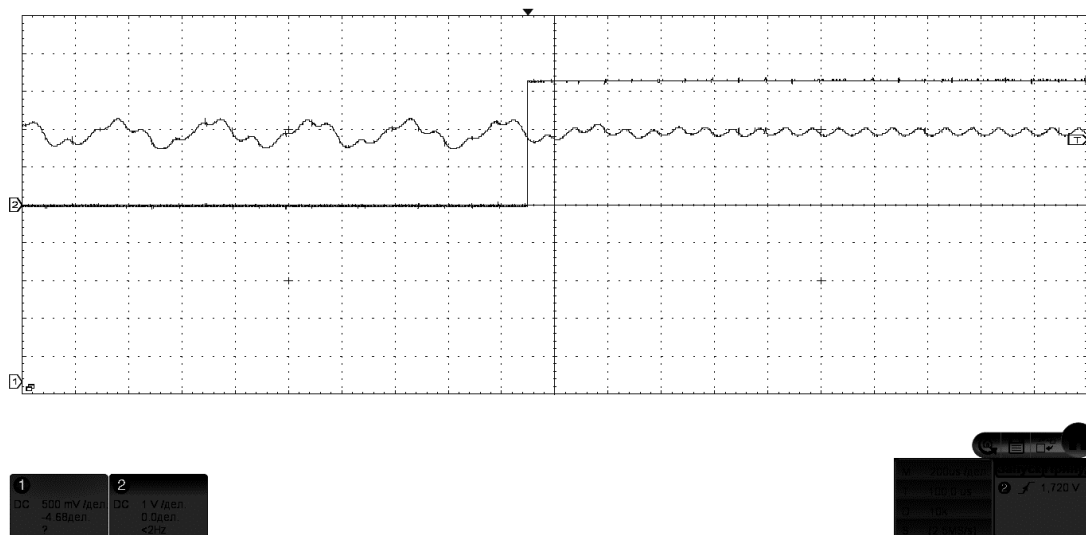


Рис. 2. Осциллограмма напряжения. Момент включения метода OGY

Таким образом продемонстрирована эффективность метода OGY при управлении нелинейными динамическими процессами импульсных преобразователей постоянного напряжения.

---

С использованием предлагаемой лабораторной установки можно осуществлять выбор оптимальных параметров метода OGY при практическом проектировании импульсных преобразователей напряжения широкого класса.

Список литературы:

1. Михальченко, С.Г. Бифуркационный анализ нелинейных динамических систем полупроводниковых преобразователей модульного типа / С.Г. Михальченко. – Томск, 2012.
2. Михальченко, С.Г. Математическое моделирование устройств энергетической электроники с гармоническим управляющим воздействием. / С.Г. Михальченко // Проблемы автоматизации энергосберегающих технологий: Межвуз. сб. науч. тр. – 1998. – С. 47–53.
3. Zhusubaliyev, Zh.T. Border collision route to quasiperiodicity: Numerical investigation and experimental confirmation / Zh.T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, S.M. Maity, S. Mohanan, S. Banerjee // Chaos. – 2006. – Т. 16. – № 2. – С. 11.
4. Zhusubaliyev, Zh.T. Bifurcations and chaos in piece-wise-smooth dynamical systems / Zh.T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde. – Singapore: World Scientific Pub Co Inc, 2003.
5. Zhusubaliyev, Z.T. C-bifurcations in the dynamics of control system with pulse-width modulation / Z.T. Zhusubaliyev, V.S. Titov, E.Y. Emelyanova, E.A. Soukhoterlin // 2000 2nd International Conference. Control of Oscillations and Chaos. Proceedings (Cat. No.00TH8521) 2000 2nd International Conference. Control of Oscillations and Chaos. Proceedings. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2000. – Vol. 1. – P. 203-204.
6. Андриянов, А.И. Нейросетевая система управления нелинейной динамикой непосредственного понижающего преобразователя напряжения / А.И. Андриянов, Н.А. Краснов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 12. – С. 33-38.
7. Андриянов, А.И. С-бифуркации в замкнутых системах автоматического управления с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией / А.И. Андриянов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2016. – № 3. – С. 97-106.
8. Андриянов, А.И. Математическое моделирование импульсных преобразователей напряжения на базе однополярной реверсивной модуляции / А.И. Андриянов, Г.Я. Михальченко // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2005. – № 1. – С. 11-19.
9. Bueno, R.S. Application of the OGY method to the control of chaotic DC-DC converters: theory and experiments / R.S. Bueno, J.L.R. Marrero // 2000

---

IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Emerging Technologies for the 21st Century. Proceedings (IEEE Cat No.00CH36353) ISCAS 2000 Geneva. 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Emerging Technologies for the 21st Century. Proceedings. – Geneva, Switzerland: Presses Polytech. Univ. Romandes, 2000. – Vol. 2. – Application of the OGY method to the control of chaotic DC-DC converters. – P. 369-372.

10. Bueno, R.S. Control of DC-DC converters in the chaotic regime / R.S. Bueno, J.L.R. Marrero // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications (Cat. No.98CH36104) 1998 International Conference on Control Applications. – Trieste, Italy: IEEE, 1998. – Vol. 2. – P. 832-837.

11. Dragan, F. Controlling a chaotic behavior of a current mode controlled boost converter using Ott-Grebogi-Yorke Method / F. Dragan // 2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics 2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. – Cluj-Napoca: IEEE, 2006. – Vol. 1. – P. 118-121.

12. Dragan, F. Controlling chaos in a current-mode controlled Boost Converter using Ott-Grebogi-Yorke and Derivate methods / F. Dragan // Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Automation & Information. – 2006. – P. 62-65.

13. Ning, Z. Two-parameter chaotic control in the voltage controlled buck converter / Z. Ning, W. Weilin // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. – Singapore: IEEE, 2003. – Vol. 2. – P. 1329-1333.

Информация об авторах:

Баранчиков Максим Викторович, студент гр. О-20-ЭиН-пэ-М, БГТУ,  
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7, [mbaranchikov@mail.ru](mailto:mbaranchikov@mail.ru)