

## Раздел II. Моделирование физических процессов и устройств

УДК 681.51

DOI 10.18522/2311-3103-2016-8-3748

О.Г. Межаков

### СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ПОНИЖАЮЩЕГО НЕИЗОЛИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

*Работа посвящена исследованию процессов управления для широтно-импульсных преобразователей постоянного тока. Рассматривается широтно-импульсный неизолированный понижающий преобразователь постоянного тока. Цель данной работы – провести синтез синергетического регулятора широтно-импульсного неизолированного преобразователя напряжения и провести оценку качества переходной характеристики выходного напряжения при различных нагрузках. Реализация алгоритмов управления на цифровых вычислителях. Регуляторы с синергетическим управлением обеспечивают асимптотическую устойчивость широтно-импульсных преобразователей относительно их желаемых режимов работы, инвариантность к изменению нагрузки широтно-импульсного преобразователя и робастность к изменению их параметров. При работе импульсного преобразователя в широком диапазоне температур окружающей среды, происходит изменение характеристик радиоэлементов под воздействием внешних факторов, которые оказывают влияние на стабильность работы системы. Возможные хаотично изменяющийся характер токовой нагрузки, выбросы и падения напряжения входной сети, сокращают время наработки на отказ радиоэлементов преобразователя напряжения. Проведенные исследования показывают целесообразность применения синергетического регулятора в импульсных источниках питания в условиях работы с неопределенными внешними возмущениями. Показано преимущество синергетического метода в сравнении с традиционными регуляторами за счет введения функций зависимости параметров радиоэлементов от внешних факторов в синтезированное управляющее воздействие. В результате повышается устойчивость системы, снижаются «стрессовые» нагрузки радиоэлементов и повышается время наработки на отказ. Рассмотрен вопрос практической реализации синтезированного синергетического регулятора, понижающего неизолированного импульсного преобразователя напряжения. Проведен сравнительный анализ периферии 8 и 32-битных микроконтроллеров. В результате определена область микроконтроллеров способных удовлетворить требованиям к вычислительным мощностям, периферии синергетического регулятора.*

*Широтно-импульсный преобразователь; понижающий неизолированный преобразователь напряжения; метод АКАР; синтез; управление; интегральная адаптация; ПИД-регулятор; переменная структура; микроконтроллер.*

O.G. Mezhakov

### SYNERGETIC CONTROLLER FOR STEP-DOWN NON-INSULATED SWITCH-MODE POWER SUPPLY

*The work is devoted to the study of control processes in pulse-width DC converters. The pulse-width non-insulated step-down DC converter is considered. The purpose of this work is to carry out the synthesis of synergetic controller for pulse-width non-insulated voltage converter and assess the quality of the output voltage transfer characteristic at different loads. Implementation of control algorithms on digital calculators is also the aim. Controllers The synergetic controllers provide an asymptotic stability for pulse-width converters relatively to their desired oper-*

ating modes, invariance to changes in pulse-width converter load and robustness to their settings change. When the pulse converter functions in a wide range of ambient temperatures, the radio characteristics change under the influence of external factors affecting the stability of the system. Possible random changes in current load, emissions and input voltage falls reduce the mean time between failures (MTBF) of the voltage converter radioelements. The studies have shown the feasibility of synergetic controller in switch-mode power supplies in working conditions of uncertain external disturbances. Shown is the advantage of synergetic method in comparison to conventional controllers owing to the implementation of functions of radio parameters dependence on external factors in the synthesized control action. The result is the system stability increase, the radioactive elements "stress" load reduction and MTBF increase. The issue of the practical realization of the synthesized synergetic controller and the step-down non-insulated voltage pulse converter is considered. A comparative analysis of the periphery of 8- and 32-bit microcontrollers is carried out. As a result, defined is the range of microcontrollers capable of meeting the requirements of computing power and the synergetic controller periphery.

*Pulse width converter; step-down non-insulated voltage converter; method of AKAR; synthesis; control; integral adaptation; PID controller; variable structure; microcontroller.*

**Введение.** Работа любой электронной схемы требует наличия одного или нескольких источников постоянного напряжения. Подавляющее большинство современных преобразователей напряжения представляют собой импульсные источники питания (ИИП). Достоинство ИИП в сравнении с линейными преобразователями заключается, в первую очередь, в большем коэффициенте полезного действия и меньших массогабаритных размерах.

Поведение ИИП описывается нелинейными математическими моделями, которые характеризуются неустойчивостью, бифуркациями, хаосом и т.д. [1]. Возникновение этих явления в ИИП обусловлено топологией печатной платы, режимами работы преобразователя, паразитными явлениями, которыми обладают радиоэлементы электрической схемы. Первые ИИП не подвергались математическому анализу, а тем более прогнозированию поведения системы, по причине отсутствия хорошей аналитической модели, которая была представлена в 1970 годах [2]. В настоящее время хаос и бифуркации в ИИП вызывают исследовательский интерес. Данным проблемам посвящено не мало работ, в которых рассматриваются способы прогнозирования возникновения хаоса ИИП при помощи компьютерного моделирования и систем дифференциальных уравнений объекта или идеализированной электрической схемы ИИП [3–6]. Как показывают результаты исследований, основными причинами возникновения хаоса является снижение нагрузки и/или изменение входного напряжения в широком диапазоне. Данные явления ухудшают технические характеристики ИИП и могут приводить к выходу из строя преобразователей. Каждый инженер, проектировавший ИИП сталкивался с бифуркационными явлениями и хаосом. Традиционно эта проблема решается инженерным подходом, заключающимся в корректировке номиналов радиоэлементов и ограничении технических параметров системы.

На практике в контролерах широтно-импульсной модуляции широкое применение нашел гистерезисный регулятор, например микросхемы TL494, MC34063 и др., принцип работы которого основан на формировании «разрешающего» сигнала компаратором при нахождении значения выходного напряжения в заданных границах. В таких системах качество стабилизации выходного напряжения зависит от точности обратной связи, опорного напряжения, скорости реакции радиоэлементов на изменение состояния их входов и устойчивости к внешним возмущениям. В целях расширения области устойчивости данный регулятор дополняют гистерезисным регулятором тока и контролем входного напряжения и т.д., например микросхема LTC1871.

В цифровых ИИП наибольшее распространение получили ПИД-регуляторы предъявляющие минимальные требования к мощностным характеристикам цифрового вычислителя, что позволило реализовывать многоканальные ИИП на ПЛИС [7, 8], микроконтроллерах и т.д. В практике параметры ПИД-регулятора часто настраиваются путем подбора с использованием опыта управления объектом, такой инженерный подход к настройке регулятора вносит существенное влияние человеческого фактора на качество работы системы и исключает возможность прогнозирования возникновения хаоса или неустойчивого поведения замкнутой системы. В ряде работ [9–11] рассматривается вопрос расширения области устойчивости ПИД-регулятора с помощью применения нечеткой логики, адаптивного управления. Однако, в таких системах при больших возмущающих воздействиях параметры настройки адаптивного управления могут сбиться, и система на некоторое время может перейти в колебательный режим со значениями, превышающими пределы регулируемой величины. Для эффективной работы традиционных алгоритмов адаптации необходимо осуществлять предварительную идентификацию объекта, однако существующие алгоритмы не для всех типов ИИП осуществляют корректно эту процедуру и не учитывают ограничения, связанные с особенностями нагрузки ИИП. При проектировании ПИД-регуляторов с нечеткой логикой правила нечеткой логики составляются на основе высказываний эксперта и не всегда исключают формирования регулятором неадекватного управляющего воздействия в нештатных режимах работы ИИП. Поэтому в работах [9–11] рассматривают преобразователи под конкретные задачи и область работы. Несмотря на присущие недостатки ПИД-регулирования с нечеткой логикой или адаптивным управлением, такие регуляторы нашли широкое применение в современных цифровых ШИМ-контроллерах, таких как UC9224, UC3138 и других.

При проектировании регуляторов с использованием теории скользящего управления в отличие от выше перечисленных учитывает динамическую модель объекта, но при этом основной задачей разработчика регулятора является построение линии переключения в фазовом пространстве объекта. При этом наклон линии должен быть выбран таким, чтобы в системе не возникали колебания. Существует несколько условий возникновения скользящего режима. Одним из них является симметричность траекторий разгона и торможения. В работе [12], как и в других рассматривается синтез скользящего регулятора при идеализированных условиях, где наблюдается только симметричность фазовых траекторий объекта. Вопрос учета изменения параметров радиоэлементов под воздействием внешних возмущений влияющие на динамику и поведение объекта не освещается.

Синергетика, как наука о самоорганизации относится к «новой» динамике. Синергетические системы обладают двумя фундаментальными свойствами. Первое обмен энергией с внешней средой. Второе, когерентность поведения между составными частями системы, то есть взаимодействие. Синергетическая теория управления базирующаяся на принципах направленной самоорганизации и динамической декомпозиции синтезируемых нелинейных систем на притягивающих инвариантных многообразиях. Она отражает идеологию единства процессов самоорганизации и управления, т.е. представляет собой своего рода симбиоз кибернетики и синергетики [13].

*Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) базируется на принципе «расширения – сжатия» фазового пространства. Целью данного регулятора заключается в переходе от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению вдоль желаемых инвариантных многообразий – аттракторов, к которым подстраиваются все другие переменные динамической системы [13]. В работах [14–20] рас-*

считается синтез управляющего воздействия для различных нелинейных систем в том числе и применение в ИИП различной топологии на основе динамической системы уравнений объекта.

Таким образом синтез регулятора, формирующего управляющее воздействие в соответствие с динамикой объекта, его физических особенностей и учета внешних неопределенных возмущений, является актуальным.

**Синергетический регулятор.** Рассмотрим синтез управляющего воздействия методом АКАР для неизолированного понижающего ИИП в режиме непрерывных токов и постоянной частоты коммутации силового ключа.

Синтез регулятора методом АКАР проводится на основе динамической системы уравнений управляемого объекта. Математическая модель понижающего ИИП составляется по законам Кирхгофа в соответствии с законами коммутации силового ключа [21]. Воспользуемся усредненной математической моделью в форме Коши, полученную в работе [22] и электрической схемой, показанной на рис. 1

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(E_{in}u - i_L r - U_{out}); \\ \frac{dU_{out}}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_{out}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_{in}$  – входное напряжение;  $u$  – рабочий цикл (управляющее воздействие);  $i_L$  – ток индуктивности;  $r$  – сопротивление обмотки индуктивности;  $U_{out}$  – выходное напряжение;  $C$  – выходной конденсатор;  $i_{out}$  – ток нагрузки

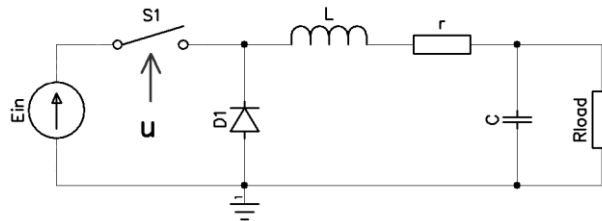


Рис. 1. Электрическая схема понижающего ИИП

Синтезированный с использованием метода АКАР регулятор должен обеспечить перевод замкнутой системы из любого состояния к аттрактору  $U_c = U_{out}$ . С целью проектирования замкнутой системы управления ИИП, обладающей свойствами инвариантности к внешним возмущающим воздействиям и робастности к изменению параметров, при синтезе регулятора будем использовать метод интегральной адаптации на инвариантных многообразиях, являющийся модификацией метода АКАР [23]. Для этого расширим исходную динамическую систему (1) дополнительным дифференциальным уравнением:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(E_{in}u - i_L r - U_{out}); \\ \frac{dU_{out}}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_{out}) - z; \\ \frac{dz}{dt} = \eta(U_c - U_{out}). \end{cases} \quad (2)$$

Вводим первую макропеременную:

$$\Psi_1 = i_L - \varphi(U_{out}, z), \quad (3)$$

где  $\varphi(U_{out}, z)$  – так называемое «внутреннее» управление системы. Подставляя (3) в основное функциональное уравнение (ОФУ)

$$\dot{\Psi}_1(t) + \alpha_1 \Psi_1 = 0 \quad (4)$$

находим внутреннее управление:

$$u = - \left( -CR_{load}U_{out} + CR_{load}ri_L - \left( \frac{d\varphi(U_{out},z)}{dU_{out}} \right) Li_LR + \left( \frac{d\varphi(U_{out},z)}{dU_{out}} \right) LU_{out} + \right. \\ \left. + \left( \frac{d\varphi(U_{out},z)}{dU_{out}} \right) LZCR_{load} - \left( \frac{d\varphi(U_{out},z)}{dU_{out}} \right) \eta LCR_{load}U_c + \left( \frac{d\varphi(U_{out},z)}{dU_{out}} \right) \eta LCR_{load}U_{out} + \right. \\ \left. + \alpha_1 LCR_{load} - LCR_{load}\varphi(U_{out},z) \right) / (E_{in}CR_{load}). \quad (5)$$

В результате попадания системы в окрестность многообразия  $\Psi_1 = 0$  (3) в системе происходит динамическая декомпозиция и поведение системы будет описываться системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{dU_{out}}{dt} = \frac{\varphi(U_{out},z) - \frac{U_{out}}{R}}{C} - z; \\ \frac{dz}{dt} = \eta(U_c - U_{out}). \end{cases} \quad (6)$$

Вводим вторую макропеременную для декомпозированной системы (6):

$$\Psi_2 = U_{out} + \gamma z. \quad (7)$$

Применяем ОФУ для нахождения  $\varphi(U_{out}, z)$ :

$$\dot{\Psi}_2(t) + \alpha_2 \Psi_2 = 0. \quad (8)$$

Из совместного решения (8) и (7) с учетом модели (6) получим выражение для внутреннего управления  $\varphi(U_{out}, z)$ , подставив которое в (5) получим

$$u = - \frac{CL\eta}{E_{in}} (\gamma(\alpha_1 + \alpha_2) - 1) (U_c - U_{out}) - \frac{L - R_{load}C(L(\alpha_1 + \gamma\eta + \alpha_2 - \alpha_1\alpha_2R_{load}C) + R_{load})}{R_{load}^2CE_{in}} * \\ * U_{out} - \frac{R_{load}C(r + L(\alpha_1 + \alpha_2 - \gamma\eta))}{R_{load}CE_{in}} i_L - \eta L \frac{1 + R_{load}C(\gamma\eta + \alpha_1\alpha_2\gamma - \alpha_1 - \alpha_2)}{R_{load}E_{in}} z. \quad (9)$$

Синтезированное управляющее воздействие обеспечить перевод динамической системы (1) из произвольного состояния вначале в окрестность многообразия  $\Psi_1 = 0$ , а затем в состояние, определяемое требуемым значением выходного напряжения  $U_c = U_{out}$ . Коэффициенты  $\alpha_1, \alpha_2, \gamma, \eta$  настраиваются таким образом, чтобы получить желаемый переходной процесс. Изменяя значение коэффициентов корректируется время выхода на заданное напряжение, выброс напряжения при изменении нагрузки, величина перерегулирования.

Сравним управляющее воздействия (9) и ПИД-регулятор. Представим ИПП под управлением традиционного регулятора [24] в виде схемы показанной на рис. 2:

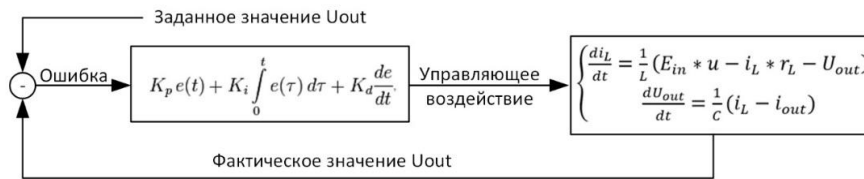


Рис. 2. Схема ИПП под управлением ПИД-регулятора

Блок ПИД-регулятора на рис. 2 во время работы оперирует только относительно величины рассогласования выходного напряжения и заданного. Управляющее воздействие формируется на основе статических П, И, Д коэффициентов и динамической ошибки. Никакой другой информации в процессе работы о состоянии системы ПИД-регулятор не получает. Управляющее воздействие (9) включает все элементы динамической системы, которые могут быть представлены в виде функций зависимости от внешних возмущений. Проведем моделирование синтезированного управляющего воздействия (9) в среде «*Matlab Simulink*». Составим электрическую схему, показанную на рисунке 3. Зададим исходные данные:

$$E_{in,max} = +36\text{В}; U_{out} = +5\text{В}; f_{sw} = 100\text{кГц}; \Delta U = +0.1\text{В}; U_{ripple} = +0.04\text{В};$$

$$I_{out} = 10\text{А}; L = 7.176 * 10^{-5}\text{Гн}; C = 1.884 * 10^{-3}\text{Ф},$$

где  $\Delta U$  – максимальный выброс напряжения на выходе при снятии нагрузки;  $U_{ripple}$  – пульсации напряжения на выходе.

Сравнение переходных процессов выходного напряжения и тока, показанные на рис. 3 и 4, позволяет утверждать, что при изменении рабочей нагрузки до 5А наблюдается ухудшение качества переходного процесса – появляются перерегулирование и затухающие колебания. Зададим в управляющем воздействии (9) сопротивление нагрузки согласно закону Ома  $R_{load} = U_{out}/i_{out}$ . В результате синтезированный с помощью метода АКАР закон управления начинает формировать управляющий сигнал оперируя действующим током, а не заданным. Результаты моделирования, представленные на рис. 5, демонстрируют, что система управления с синергетическим регулятором с подстраиваемым значением сопротивления нагрузки обрабатывает заданное значение выходного напряжения, но при этом имеется незначительное перерегулирование переходного процесса.

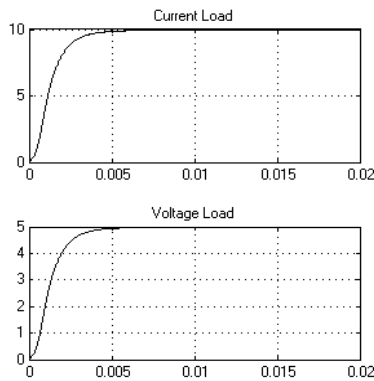


Рис. 3. Результаты моделирования понижающего ИИП при нагрузке равной 10 А

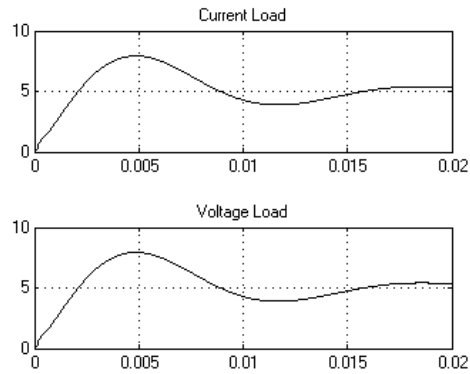


Рис. 4. Результаты моделирования понижающего ИИП при нагрузке равной 5 А

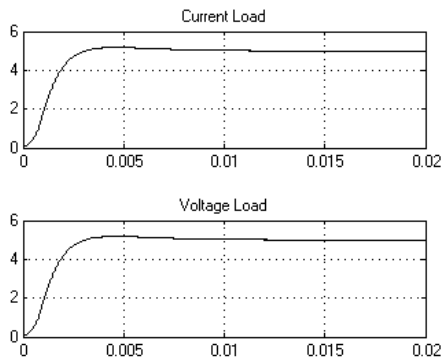


Рис. 5. Динамический коэффициент сопротивление нагрузки

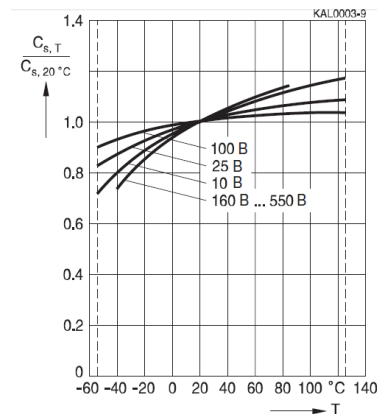


Рис. 6. Нормирование емкости  $C_S$  от температуры окружающей среды

Внешняя среда оказывает влияние на параметры радиоэлементов ИИП. В следствии чего качество стабилизации выходного напряжения снижается и может привести к потере устойчивости ИИП [1–6]. Например, емкость выходного электролитического конденсатора  $C$  имеет нелинейную функцию зависимости от температуры окружающей среды, такие данные доступны в технической документации. На рисунке 6 представлены графики зависимости емкости электролитических конденсаторов фирмы «Epcos» от окружающей температуры. На примере изменения сопротивления нагрузки в уравнении (9) на номинальное значение, рассчитанное по закону Ома, могут быть введены различные функции зависимости остальных параметров преобразователя.

Не смотря на повышения качества переходного процесса в синтезированном управляющем воздействии методом АКАР, имеется перерегулирование при понижении тока нагрузки, так как регулятор настроен на ток нагрузки равный 10А. Для устранения перерегулирования модернизируем синтезированный синергетический регулятор сделав коэффициент  $\alpha_2$  переменным.

Проведя анализ графики переходного процесса относительно выходного напряжения и производной от выходного напряжения можно разбить график на три участка: разгон, выход на режим, торможение. Сформулируем правила изменения коэффициента  $\alpha_2$  на этих участках. Первоначальное значение  $\alpha_2$  инициализируется равное нулю. На участке разгона введем линейное увеличение значения  $\alpha_2$  с целью сокращения времени выхода на режим. При попадании область выхода на режим коэффициент  $\alpha_2$  фиксируем. Необходимо определить границы области выхода на режим можно определить в пределах от -10 до значения производной, соответствующей 80 % заданного значения  $U_{out}$ , то есть +4В. Из графика верхнюю границу определим равной 10. В области торможения коэффициент  $\alpha_2$  должен линейно уменьшаться.

Запишем полученные правила:

```

if speed < (-1)
    if alpha2 <= 1000
        alpha2_out = alpha2 + 0.005;
    end
elseif speed > 10
    alpha2_out = alpha2 - 0.0025;
else
    alpha2_out = alpha2;
end
    
```

На рис. 9 представлены результаты моделирования замкнутой системы с синергетическим регулятором с изменяющимся коэффициентом  $\alpha_2$  при токе нагрузки равном 1А. Сравнительный анализ результатов моделирования, представленных на рис. 5 и 9, демонстрирует, что при введении правил изменения коэффициента  $\alpha_2$  время выхода на режим не изменилось, но в переходном процессе относительно выходного напряжения отсутствует перерегулирование. На основе разработанного алгоритма регулятора с переменным коэффициентом функционального уравнения можно реализовать сервисную функцию «Soft-Start». Плавный пуск обеспечивает не только контроль за скоростью выхода на заданное напряжение, но также повышает рабочий ресурс выходных электролитических конденсаторов, ограничивая ток заряда.

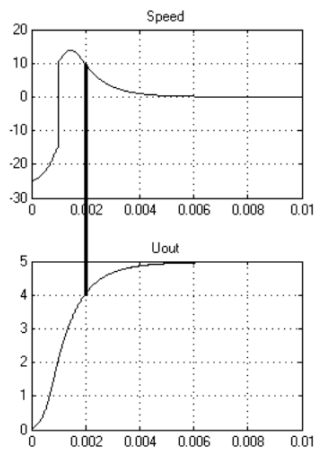


Рис. 7. Осциллограмма без перерегулирования

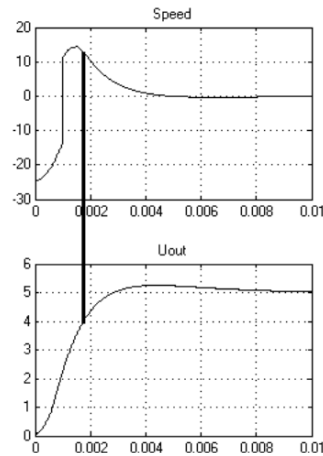


Рис. 8. Осциллограмма с перерегулированием

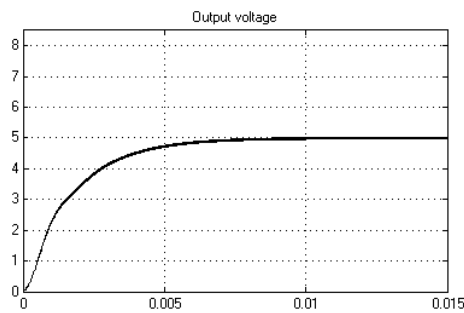


Рис. 9. Метод АКАР с переменной структурой при токе нагрузки 1А

**Практическая реализация синергетического регулятора.** При практической реализации нелинейных регуляторов ИИП у разработчиков возникает ряд затруднений, такими как наличие четких методик настройки параметров регулятора, определение необходимой мощности цифрового вычислителя и др. Конечно можно в качестве исполнительного цифрового вычислителя выбрать мини-компьютер, например «*Raspberry Pi x, Cubieboard*» и др. Мощность процессоров данных мини-компьютеров высока, но вот по массогабаритным размерам и ценовому диапазону они уступают аналоговым ШИМ-контроллерам. При реализации традиционных регуляторов разработчик располагает рядом сервисов связанных с расчетом параметров настройки регуляторов, например с использованием пакетов *Matlab* и *Simulink* можно выполнить расчет параметров ПИД-регулятора и генерацию программного кода на языках *C#* и *C++* для программирования ПЛИС фирмы «*Altera*».

Рассмотрим особенности синтезированного управляющего воздействия (9), которые придётся учитывать при практической реализации: наличие переменных с плавающей точкой; наличие в законе управления различных математических операций; необходимость наличия датчиков тока нагрузки и выходного напряжения. Данные обстоятельства накладывают ограничения на выбор вычислителя, на котором возможна реализация данного регулятора. Стоит отметить, что преобразование переменных типа «*float*» в тип «*int*» не всегда возможно, кроме того необходимость измерения тока нагрузки требует наличие дополнительного высокопроиз-



водительного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), также необходимо учесть необходимость реализации цифрового фильтра для второго канала измерения. Необходимым функционалом и мощностями обладают 32-bit микроконтроллеры со встроенными параллельно работающими АЦП. При наличии переменных с плавающей точкой дополнительно потребуется математический сопроцессор.

В качестве управляющей микросхемы для построения цифрового синергетического регулятора понижающего ИИП была выбрана плата *Stm32f4Discovery* на базе микроконтроллера *STM32F407VG*. Таймер работает на частоте 42МГц и настроен на генерацию ШИМ-сигнала с частотой 100кГц. Расчет управляющего воздействия происходит с частотой 100 кГц. В целях оптимизации быстродействия микроконтроллера передача данных от АЦП происходит по *DMA*.

Фотографии осциллограмм синергетической системы управления понижающим ИИП выполненной на макетной плате представлены на рис. 10 и 11. Результаты натурного эксперимента подтверждают эффективность синтезированной системы управления ИИП.

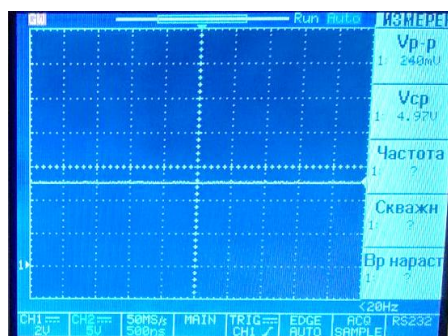


Рис. 10. Осциллограмма выходного напряжения

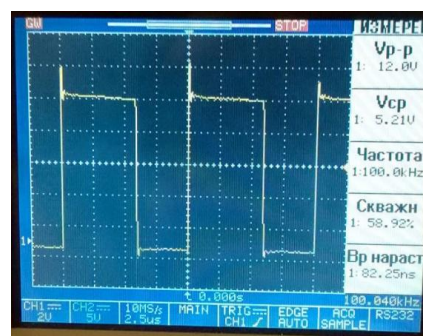


Рис. 11. Осциллограмма сигнала стока Р – канального полевого транзистора

**Заключение.** В работе рассматривается задача синтеза и реализации синергетического регулятора понижающим ИИП с учетом его нелинейных свойств. Помимо традиционной схемы синергетического регулятора рассматривается модифицированная схема с изменяющимся коэффициентом основного функционального уравнения, что позволило повысить не только качество переходной характеристики системы, но и учесть изменения под воздействием внешних неопределенных возмущений параметров радиоэлементов ИИП. В работе рассмотрены вопросы реализации синтезированного синергетического регулятора и проведения натурных экспериментов. Проведенные исследования показывают преимущества применения синергетических регуляторов при проектировании цифровых систем управления, работающих в переменных условиях окружающей среды, в сравнении с традиционными регуляторами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chi, Kong Tse.* Complex behavior of switching power converters // CRC PRESS. – 2004.
2. *Middlebrook R.D. and C'uk S.* A general unified approach to modeling switching-converter power stages // in Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf. – 1976. – P. 18-34.
3. *Pelin D., Flegar I., Fischer D.* Prediction and observation of chaos in the buck converter // Faculty of Electrical Engineering & Technical College Zagreb, University of Osijek. – 2007.
4. *Somnath Maity, Tapas K. Bhattacharya and Soumitro Banerjee.* Experimental Study of Chaos and Bifurcation in the Buck Converter // National conference on nonlinear systems & dynamics. – 2006.

5. *Kocewjak L., Leth Bak C., Munk-Nielsen Stig.* Bifurcations and Chaos in a Pulse Width Modulation Controlled Buck Converter // Institute of Energy Technology, Aalborg University, Pontoppidanstræde 101, 9220 Aalborg, Denmark 2008.
6. *Feigin M.I.* Doubling of the oscillation period with C-bifurcations I piecewise continuous systems // PMM. – 1970. – Vol. 34.
7. *Zurita-Bustamante E.W., Linares-Flores J., Guzmán-Ramírez E., S.-Ramírez H.* FPGA Implementation of PID Controller for the Stabilization of a DC-DC “Buck” Converter. Universidad del Istmo, Mexico.
8. *Shubhangi V. Pati, Tejashree R. Shukla, Paresh J. Shah.* Modeling of PID controller based smps using FPGA // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2012.
9. *Bayati Poodeh M., s. Eshtehardiha, m.R. Zare.* Application of Fuzzy Logic to Control the DC-DC Converter // 7th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Venice, Italy, November 21-23, 2007.
10. *Priyanka Srivastava, Sh. S.K. Singh, Sh. Nishant Tripathi.* Study of fuzzy logic and PID controller in buck-boost converter // International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET). – 2014. – Vol. 3, Issue 6.
11. *Reza Ilka, S. Asghar Gholamian, Behrouz Rezaie and Alireza Rezaie.* Fuzzy Control Design for a DC-DC Buck Converter based on Recursive Least Square Algorithm // International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA). – 2012. – Vol. 2, No. 6.
12. *Guldemir Hanifi.* Study of Sliding Mode Control of Dc-Dc Buck Converter // Energy and Power Engineering. – 2011. – P. 401-406.
13. *Колесников А.А.* Современная прикладная теория управления. Ч. 2. Синергетический подход в теории управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 558 с.
14. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В.* Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы. – М.: Едиториал УРСС, 2005.
15. *Веселов Г.Е., Кондратьев И.В., Медведев М.Ю.* Синергетическое управление широтно-импульсными преобразователями // Нелинейный мир. – 2004. – Т. 2, № 4. – С. 266-277.
16. *Kondratiev I., Santi B., Dougal R., Veselov G.* Synergetic control for dc-dc buck converters with constant power load // 35th Annual IEEE Power Electronics Conference. 20 25 June. Aachen. Germany. 200-1. – P. 3758-3764.
17. *Kondratiev I., Santi B., Dougal R., Veselov G.* Synergetic control for m-parallel connected dc-dc buck converters // 35th Annual IEEE Power Electronics Conference. 20 25 June. Aachen. Germany. 2004. – P. 182-188.
18. *Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Kravtchenko P., Pogorelov M., Dougal R., Kondratiev I.* Synergetic Synthesis of Adaptive Regulators for DC/DC Boost Converters [Text]/ Power System 2002 Conference «Impact of Distributed Generation». March 13 15. Clemson. SC. USA. 2002.
19. *Kolesnikov A. Veselov G., Popov A. Kolesnikov Al., Medvedev M., Dougal R. Kondratiev I.* Synergetic Control for Group of DC/DC Buck Converters // Power System 2002 Conference «Impact of Distributed Generation». March 13-15, Clemson, SC, USA, 2002.
20. *Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Monti A., Ponci F., Santi E., Dougal R.* Synergetic synthesis of DC-DC converter controller: Theory and Experimental Analysis // IEEE APEC. March 10 14. Dallas. Texas. USA. 2002. – P. 401-415.
21. *Kazimierczuk M.K.* Pulse-width modulated dc–dc power converters. – 2008.
22. *Межаков, О.Г.* Математическая модель понижающего преобразователя напряжения // Молодой ученый. – Март 2015. – С. 171-176.
23. *Колесников А.А.* Метод интегральной адаптации нелинейных систем на инвариантных многообразиях: наилучшие возмущения // Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010) ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2010. – С. 22-28.
24. *Katsuhiko Ogata.* Modern Control Engineering. Fifth Edition.

## REFERENCES

1. *Chi, Kong Tse.* Complex behavior of switching power converters, *CRC PRESS*, 2004.
2. *Middlebrook R.D. and C’uk S.* A general unified approach to modeling switching-converter power stages, in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, 1976, pp. 18-34.

3. *Pelin D., Flegar I., Fischer D.* Prediction and observation of chaos in the buck converter, *Faculty of Electrical Engineering & Technical College Zagreb, University of Osijek*, 2007.
4. *Sommath Maity, Tapas K. Bhattacharya and Soumitro Banerjee.* Experimental Study of Chaos and Bifurcation in the Buck Converter, *National conference on nonlinear systems & dynamics*, 2006.
5. *Kocewiak L., Leth Bak C., Munk-Nielsen Stig.* Bifurcations and Chaos in a Pulse Width Modulation Controlled Buck Converter, *Institute of Energy Technology, Aalborg University, Pontoppidanstræde 101, 9220 Aalborg, Denmark 2008*.
6. *Feigin M.I.* Doubling of the oscillation period with C-bifurcations I piecewise continuous systems, *PMM*, 1970, Vol. 34.
7. *Zurita-Bustamante E.W., Linares-Flores J., Guzmán-Ramírez E., S.-Ramírez H.* FPGA Implementation of PID Controller for the Stabilization of a DC-DC “Buck” Converter. *Universidad del Istmo, Mexico*.
8. *Shubhangi V. Pati, Tejashree R. Shukla, Paresh J. Shah.* Modeling of PID controller based smps using FPGA, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2012.
9. *Bayati Poodeh M., s. Eshtehardiha, m.R. Zare.* Application of Fuzzy Logic to Control the DC-DC Converter, *7th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Venice, Italy, November 21-23, 2007*.
10. *Priyanka Srivastava, Sh. S.K. Singh, Sh. Nishant Tripathi.* Study of fuzzy logic and PID controller in buck-boost converter, *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)*, 2014, Vol. 3, Issue 6.
11. *Reza Ilka, S. Asghar Gholamian, Behrouz Rezaie and Alireza Rezaie.* Fuzzy Control Design for a DC-DC Buck Converter based on Recursive Least Square Algorithm, *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*, 2012, Vol. 2, No. 6.
12. *Guldemir Hanifi.* Study of Sliding Mode Control of Dc-Dc Buck Converter, *Energy and Power Engineering*, 2011, pp. 401-406.
13. *Kolesnikov A.A.* Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya [Modern applied control theory]. Part 2. *Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya* [Synergetic approach in control theory]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 558 p.
14. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kuz'menko A.A., Pogorelov M.E., Kondrat'ev I.V.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: energeticheskie sistemy [Synergetic control methods of complex systems: the energy system]. Moscow: Editorial URSS, 2005.
15. *Veselov G.E., Kondrat'ev I.V., Medvedev M.Yu.* Sinergeticheskoe upravlenie shirotno-impul'snymi preobrazovatelayami [Synergetic control for pulse width modulated converters], *Nelineynyy mir* [Nonlinear world], 2004, Vol. 2, No. 4, pp. 266-277.
16. *Kondratiev I., Santi B., Dougal R., Veselov G.* Synergetic control for dc-dc buck converters with constant power load, *35th Annual IEEE Power Electronics Conference. 20 25 June. Aachen. Germany. 2001*, pp. 3758-3764.
17. *Kondratiev I., Santi B., Dougal R., Veselov G.* Synergetic control for m-parallel connected dc-dc buck converters, *35th Annual IEEE Power Electronics Conference. 20 25 June. Aachen. Germany. 2004*, pp. 182-188.
18. *Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Kravtchenko P., Pogorelov M., Dougal R., Kondratiev I.* Synergetic Synthesis of Adaptive Regulators for DC/DC Boost Converters, *Power System 2002 Conference «Impact of Distributed Generation».* March 13 15. *Clemson. SC. USA. 2002*.
19. *Kolesnikov A. Veselov G., Popov A. Kolesnikov Al., Medvedev M., Dougal R. Kondratiev I.* Synergetic Control for Group of DC/DC Buck Converters, *Power System 2002 Conference «Impact of Distributed Generation».* March 13-15, *Clemson, SC, USA, 2002*.
20. *Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Monti A., Ponci F., Santi E., Dougal R.* Synergetic synthesis of DC-DC converter controller: Theory and Experimental Analysis, *IEEE APEC. March 10 14. Dallas. Texas. USA. 2002*, pp. 401-415.
21. *Kazmierczuk M.K.* Pulse-width modulated dc–dc power converters, 2008.
22. *Mezhakov O.G.* Matematicheskaya model' ponizhayushchego preobrazovatelya napryazheniya [Mathematical model of voltage step-down converter], *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. Mart 2015, pp. 171-176.

23. Kolesnikov A.A. Metod integral'noy adaptatsii nelineynykh sistem na invariantnykh mnogoobraznykh: naikhudshie vozmushcheniya [The method of integrated adaptation of non-linear systems on the invariant manifolds: the worst perturbation], *Materialy 6-y nauchnoy konferentsii «Upravlenie i informatsionnye tekhnologii» (UIT-2010) OAO «Kontsern «TsNII «Elektropribor»* [Proceedings of the 6th conference "Control and Information Technologies" JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor"], 2010, pp. 22-28.
24. Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. Fifth Edition.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.Е. Веселов.

**Межаков Олег Геннадьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: Lecter2005@yandex.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, к. 403; тел.: +79287775399; аспирант.

**Mezhakov Oleg Genad'evich** – South Federal University; e-mail: Lecter2005@yandex.ru; 2, Chekhov street, k. 403, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79287775399; graduate student.

УДК 621.396.93

DOI 10.18522/2311-3103-2016-8-4858

**Н.Н. Кисель**

### **КОМБИНИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ДЛЯ РАСЧЕТА ВОЗБУЖДЕНИЯ КРУГОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА С НЕОДНОРОДНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ**

*В ряде прикладных задач технической электродинамики, таких как дефектоскопия, радиочастотная томография, возникает необходимость строгого анализа электромагнитных полей рассеяния от неоднородных магнитодиэлектрических объектов. Результаты таких исследований используются для разработки средств неразрушающего контроля, создания новых конструкционных материалов с заданными электродинамическими свойствами, при решении вопросов электромагнитной совместимости и, особенно, при изучении взаимодействия электромагнитных волн с биологическими структурами. При этом во многих случаях требуется рассматривать объекты сравнительно простой формы (многошлойная сфера, цилиндр), но со сложной внутренней структурой. Например, при микроволновых исследованиях в медицинских целях для минимизации паразитного рассеяния облучаемая модель (например, фантом с параметрами реальной биологической ткани) обычно размещается в цилиндрической ювете с согласующим раствором. В работе получено решение модельной двумерной задачи возбуждения кругового цилиндра из однородного диэлектрика, во внутренней области которого имеется неоднородный диэлектрический объект для случая  $H$ -поляризации падающего поля. Решение 2-мерной задачи возбуждения кругового цилиндра из однородного диэлектрика, во внутренней области которого имеется неоднородное включение, сведено к СЛАУ относительно значений поля в поперечном сечении включения. Особенность алгоритма состоит в сочетании строгих методов интегральных уравнений и собственных функций. Такой подход позволяет исключить интегрирование по объему однородной части или внешней границе структуры, повысив тем самым экономичность алгоритма. Использование функции Грина неограниченного пространства с параметрами вмещающей среды позволяет повысить вычислительную эффективность метода, поскольку неоднородным включением оказывается лишь область с ненулевым электродинамическим контрастом. При наличии сильного затухания в объеме однородной части цилиндра, характерного для биологических объектов, многие элементы матрицы СЛАУ будут близки к нулю, что можно учесть при составлении экономичных вычислительных алгоритмов для матриц ленточного типа. Предложенная методика может быть обобщена для трехмерной модели, в случае, если ограничивающее однородное пространство представляет собой сферу.*

*Электродинамическое поле; вычислительный алгоритм; цилиндр; диэлектрик; интегральное уравнение; собственные функции.*