

# НЕЛИНЕЙНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПОНИЖАЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

С.А. Кочетков

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [kos@ipu.ru](mailto:kos@ipu.ru)

**Ключевые слова:** понижающий преобразователь напряжения, неизвестная нагрузка, релейный закон управления.

**Аннотация:** Понижающие преобразователи напряжения широко используются в технике в качестве источников питания и стабилизаторов напряжения. Основой преобразователя является ключевой элемент, с помощью которого осуществляется перераспределение входной энергии в выходную в зависимости от необходимого коэффициента передачи. Выходное напряжение преобразователя зависит от величин входного напряжения и внешней нагрузки. С учетом ключевой природы преобразователя в статье разработан робастный релейный закон управления, позволяющий стабилизировать выходное напряжение при переменной нагрузке и выходном напряжении при невозможности их измерения.

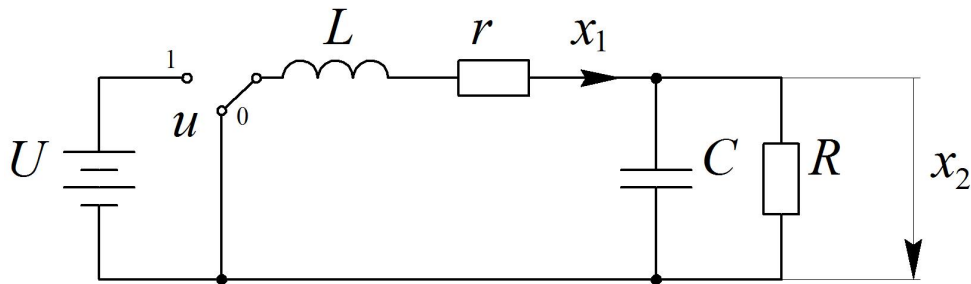
## 1. Введение

Основным назначением полупроводниковых преобразователей напряжения является их использование в качестве источников питания и стабилизаторов напряжения [1]. Данные устройства нашли широкое применение в повседневной жизни и промышленности, а с развитием современных технологий получения электроэнергии на основе ветряных генераторов, солнечных батарей, приливных электростанций их эволюция получила новый виток. Основой любого преобразователя напряжения являются реактивные накопители энергии (индуктивные и емкостные элементы) и ключевое устройство. С развитием полупроводниковой техники удастся отказаться от механических переключающих устройств, и использовать в качестве ключевых элементов полупроводниковые диоды, транзисторы, тиристоры с частотой переключения, в зависимости от мощности, до сотен тысяч килогерц. Основной задачей, связанной с управлением полупроводниковыми преобразователями напряжения, является стабилизация выходного напряжения в зависимости от входного напряжения и нагрузки потребителя. При отсутствии возможности измерения тока потребления возникает проблема стабилизации выходного напряжения. В статье разработан нелинейный разрывной закон управления, позволяющий стабилизировать выходное напряжение при изменении указанных величин в широком диапазоне. Разработанный

алгоритм управления может быть реализован с помощью полупроводниковых ключевых элементов с использованием широтно-импульсной модуляции с постоянной частотой переключения, что позволяет оптимизировать тепловые потери в преобразователе.

## 2. Постановка задачи

Основные элементы конструкции полупроводникового понижающего преобразователя напряжения представлены на рис. 1, где  $L$  – индуктивность преобразователя,  $C$  – накопительная емкость,  $r$  – электрическое сопротивление обмотки индуктивности,  $U$  – величина входного напряжения,  $x_1$  – величина тока в обмотке индуктивности,  $x_2$  – величина выходного напряжения,  $R$  – неизвестная величина электрического сопротивления нагрузки.



Математическая модель преобразователя может быть записана в форме [2]

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{r}{L}x_1 - \frac{1}{L}x_2 + \frac{U}{L}u, \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2. \end{aligned}$$

Согласно схеме все переменные и параметры системы (1) положительные, кроме того делаются следующие предположения о величине тока нагрузки и входного напряжения

$$(2) \quad I = \frac{x_2}{R} < I_0, \quad U \geq U_0,$$

где  $I$  – величина тока нагрузки.

В предположении, что переменная  $x_2(t)$  доступна измерению, в статье ставится задача регулирования величины выходного напряжения

$$(3) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{x}_2(t)| = 0, \quad \bar{x}_2(t) = x_2(t) - x_{2d}, \quad x_{2d} < U_0,$$

где  $x_{2d} = \text{const} > 0$  – желаемое значение выходного напряжения, последнее неравенство непосредственно следует из схемы преобразователя согласно закону Кирхгофа [2].

## 3. Синтез закона управления

Параметры полупроводникового преобразователя подобраны таким образом, что в системе (1) существует разделение движений по темпам, при этом ток в катушке

индуктивности может быть изменен достаточно быстро до необходимых величин в отличие от величины выходного напряжения на емкости, которая является достаточно инертным элементом, предназначенным, в том числе, для фильтрации пульсаций выходного напряжения. В силу указанных особенностей, поставленная в исследовании задача может быть решена за счет правильного изменения тока в обмотке индуктивности.

Запишем уравнения системы (1) относительно невязки  $\bar{x}_2(t)$

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}_2 &= -\frac{1}{RC}\bar{x}_2 + \frac{1}{C}x_1 - \frac{x_{2d}}{RC}, \\ \dot{x}_1 &= -\frac{r}{L}x_1 - \frac{1}{L}\bar{x}_2 - \frac{x_{2d}}{L} + \frac{U}{L}u,\end{aligned}$$

Вводя новую переменную  $\bar{x}_1 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{x_{2d}}{RC}$  и подставляя ее в последнюю систему, получим

$$(4) \quad \begin{aligned}\dot{\bar{x}}_2 &= -\frac{1}{RC}\bar{x}_2 + \bar{x}_1, \\ \dot{\bar{x}}_1 &= -\frac{r}{L}\bar{x}_1 - \frac{1}{LC}\bar{x}_2 - \frac{x_{2d}}{LC}\left(1 + \frac{r}{R}\right) + \frac{U}{LC}u,\end{aligned}$$

Для реализации одной из модификаций «вихревого алгоритма» [3], выберем управляющее воздействие в виде разрывной функции

$$(5) \quad u = \frac{1}{2}[1 - \text{sign}(\bar{x}_2)]$$

Запишем уравнения замкнутой системы с учетом (1), (3)–(5)

$$(6) \quad \begin{aligned}\dot{\bar{x}}_2 &= -\frac{1}{RC}\bar{x}_2 + \bar{x}_1, \\ \dot{\bar{x}}_1 &= -\frac{r}{L}\bar{x}_1 - \frac{1}{LC}\bar{x}_2 - \frac{x_{2d}}{LC}\left(1 + \frac{r}{R}\right) + \frac{U}{2LC}[1 - \text{sign}(\bar{x}_2)],\end{aligned}$$

С учетом неравенств (2)–(3) можем записать  $R > R_0 = U_0/I_0$ . Согласно результатам работы [4] при  $U_0 > [(1+r/R_0)x_{2d}]/LC$  система (6) асимптотически устойчива.

## 4. Заключение

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-01-00846А).

## Список литературы

1. Ромаш Э.М., Драбович Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н. Высокочастотные транзисторные преобразователи. М.: Радио и связь, 1988.
2. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Т. 1. СПб.: Питер, 2004.
3. Kochetkov S.A., Utkin V.A. Invariance in systems with unmatched perturbations // Automation and Remote Control. 2013. Vol. 74, No. 7. P. 1097-1127.
4. Кочетков С.А., Уткин А.В., Уткин В.А. Robust control of electromagnetic suspension based on vortex algorithms // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76, No 9. P. 1689-1703.