

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

УДК 62-50:519.216

СИНТЕЗ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КУКА*

Е.А. АКСЕНОВ¹, В.Д. ЮРКЕВИЧ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры автоматики. E-mail: efimke54@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики. E-mail: yurkev@mail.ru

В автономных системах электрического питания широко применяются импульсные преобразователи для стабилизации напряжения, получаемого от первичных источников. Существует множество различных типов импульсных преобразователей напряжения, среди которых часто применяются преобразователи Кука. Особенностью преобразователей Кука является малый уровень высокочастотных помех, которые вносятся преобразователем в цепь первичного источника питания. В то же время сложная нелинейная динамика и медленные колебания являются неотъемлемым свойством переходных процессов в преобразователях Кука. Поэтому проблема синтеза эффективных регуляторов для преобразователей Кука является предметом многих исследований. В частности, существует множество работ, посвященных проблеме синтеза регуляторов для преобразователей Кука на основе методологии синтеза систем с организацией скользящих режимов. Однако в системах со скользящими режимами частота переключений, а также моменты переключений могут изменяться в зависимости от режима работы и параметров преобразователя напряжения. В то же время в импульсных преобразователях напряжения режим переключения обычно организуется с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ), где частота переключений и моменты переключений задаются параметрами ШИМ. В статье обсуждается синтез системы управления с тремя каскадами для преобразователя Кука. В первом каскаде управление входным током обеспечивается посредством ШИМ и пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. Во втором – напряжение на емкости для передачи энергии стабилизируется ПИ регулятором. Наконец, в третьем каскаде желаемое напряжение на емкости, запасающей энергию, обеспечивается интегральным (И) регулятором. Синтез обоих ПИ регуляторов основан на методе разделения движений. Приведены результаты численного моделирования рассматриваемой системы управления.

* Статья получена 29 июля 2015 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-01004-а).

Ключевые слова: преобразователи постоянного напряжения, импульсные преобразователи, преобразователь Кука, силовая электроника, широтно-импульсная модуляция, ПИ регулятор, управление, нелинейные системы, метод разделения движений

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-7-20

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем автономных систем электрического питания является нестабильность напряжения первичных источников. Поэтому широко используются импульсные преобразователи для стабилизации напряжения, получаемого от первичных источников. Существует множество различных типов импульсных преобразователей напряжения [1–4], среди которых часто применяются преобразователи Кука [5–7]. Особенностью преобразователей Кука является малый уровень высокочастотных помех, которые вносятся преобразователем в цепь первичного источника питания. Сложная динамика и медленные колебания являются неотъемлемым свойством переходных процессов в преобразователях Кука. Проблема синтеза эффективных регуляторов для преобразователей Кука поднимается во многих исследовательских работах (например, часто применяются системы управления на основе формирования скользящих режимов) [8–11]. В данной работе рассматривается применение метода разделения движений [12–14] для синтеза системы управления преобразователем Кука. При этом в системе формируются быстрые и медленные процессы. В результате разделения темпов переходных процессов обеспечиваются желаемые переходные процессы в системе управления и подавление возмущений, вызываемых изменениями напряжения источника питания и сопротивления нагрузки.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КУКА

Упрощенная схема преобразователя Кука представлена на рис. 1. Данная электрическая схема позволяет повышать или понижать выходное напряжение, получаемое с источника питания E , путем изменения режима коммутации транзистора VT [5, 6, 8].

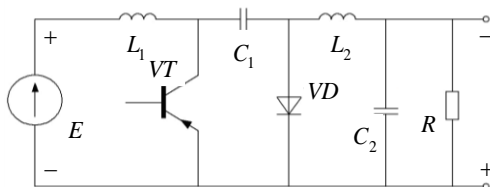


Рис. 1. Упрощенная схема преобразователя Кука

Схема преобразователя Кука состоит из двух индуктивностей L_1 и L_2 , двух емкостей C_1 и C_2 , нагрузки R , источника входного напряжения E и двух ключей. Эти ключи могут быть реализованы на основе, например, транзистора VT и диода VD , переключающих схему между противоположными режимами. В данной работе ключи, индуктивности и емкости рассматриваются как идеальные элементы без учета их активных сопротивлений. Преобразователь Кука имеет два режима работы, определяемых посредством коммутационной функции u . При $u = 1$ транзистор открыт, а диод находится в закрытом состоянии, соответственно при $u = 0$ транзистор закрыт и диод находится в открытом состоянии. Поведение токов и напряжений в рассматриваемой электрической схеме описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{I}_{L1} = \frac{E}{L_1} - \frac{1}{L_1} U_{C1}(1-u), \\ \dot{U}_{C1} = \frac{1}{C_1} U_{C1}u + \frac{1}{C_1} I_{L1}(1-u), \\ \dot{I}_{L2} = -\frac{1}{L_2} U_{C1}u - \frac{1}{L_2} U_{C2}, \\ \dot{U}_{C2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{RC_2} U_{C2}. \end{cases} \quad (1)$$

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Система управления для преобразователя Кука должна обеспечить стабилизацию напряжения на выходе и подавление возмущений в виде переменных величин сопротивления нагрузки R и входного напряжения E , т. е. свойство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U_{C2}(t) = U_{C2}^d, \quad (2)$$

где U_{C2}^d – желаемое значение напряжения U_{C2} , падающего на емкости C_2 .

В статье применяется каскадная структура системы управления, показанная на рис. 2, где внутренний регулятор C_{IL1} тока I_{L1} через индуктивность L_1 обеспечивает выполнение условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} I_{L1}(t) = I_{L1}^d. \quad (3)$$

Здесь I_{L1}^d – желаемое значение тока через индуктивность L_1 . Внешний регулятор C_{UC1} формирует задающее воздействие I_{L1}^d для внутреннего контура, чтобы обеспечить выполнение условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U_{C1}(t) = U_{C1}^d, \quad (4)$$

где U_{C1}^d – желаемая величина напряжения U_{C1} , падающего на емкости C_1 . Наконец, следующий внешний регулятор C_{UC2} обеспечивает выполнение требования (2).

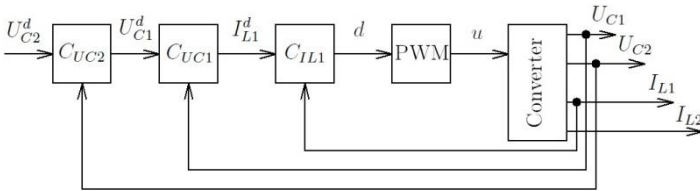


Рис. 2. Блок-схема системы с тремя управляющими каскадами и ШИМ в канале управления

Коммутационный режим преобразователя обеспечивается с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ), показанного на рис. 2. Входным сигналом ШИМ является величина коэффициента заполнения импульса d , принимающая значения из интервала $(0,1)$. Величина коэффициента заполнения импульса d формируется как выходной сигнал регулятора C_{IL1} . Сигнал на выходе ШИМ задан коммутационной функцией $u(t)$ следующего вида:

$$u = \begin{cases} 1, & \text{если } t_k < t \leq t_k + d(t_k)T_s, \\ 0, & \text{если } t_k + d(t_k)T_s < t \leq t_k + T_s, \end{cases} \quad (5)$$

где T_s – период квантования ШИМ, $d(t_k)$ – величина коэффициента заполнения импульса при $t = t_k$, $t_k = \kappa T_s$, $\kappa = 0, 1, 2, \dots$. В соответствии со структурной схемой на рис. 2, коэффициент заполнения импульса $d(t_k)$ есть значение сигнала $d(t)$ в момент квантования $t_k = \kappa T_s$, где сигнал $d(t)$ является выходом на внутренний регулятор C_{IL1} тока I_{L1} .

3. УСРЕДНЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КУКА

В дальнейшем при рассмотрении процессов в преобразователе Кука предполагается, что выполняются следующие предположения:

1) широтно-импульсный модулятор не находится в насыщении, т. е. следующее неравенство $0 < d < 1$ выполняется;

2) период квантования T_s полагается малой величиной в сравнении с постоянными времени, связанными с динамическими свойствами преобразователя.

В условиях данных предположений поведение системы (1) с разрывным управлением совпадает с поведением усредненной модели, где усреднение осуществляется по времени за период квантования ШИМ в соответствии с методом доопределения А.Ф. Филиппова [15]. Принимая во внимание результаты работы [16], усредненное во времени поведение системы (1) с ШИМ и коммутационной функцией (5) приближается с увеличением частоты ШИМ к поведению непрерывной модели (модель усредненного по времени поведения системы), которую можно получить в данном случае путем замены коммутационной функции $u(t)$ в выражении (1) на коэффициент заполнения импульса $d(t)$. В результате такой замены получим

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{L1} = \frac{E}{L_1} - \frac{1}{L_1} U_{C1}(1-d), \\ \dot{U}_{C1} = \frac{1}{C_1} U_{C1}d + \frac{1}{C_1} I_{L1}(1-d), \\ \dot{I}_{L2} = -\frac{1}{L_2} U_{C1}d - \frac{1}{L_2} U_{C2}, \\ \dot{U}_{C2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{RC_2} U_{C2}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $0 < d < 1$. Усредненная модель (6) используется для синтеза регулятора.

4. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТОКА

Рассмотрим уравнение для регулятора C_{IL1} , заданное следующим выражением:

$$\mu_{I1}^2 d^{(2)} + d_{I1} \mu_{I1} d^{(1)} = k_{I1} \left[\left(I_{L1}^d - I_{L1} \right) / T_{I1} - I_{L1}^{(1)} \right], \quad (7)$$

где μ_{I1} – маленький положительный параметр регулятора, $\mu_{I1} > 0$, $d_{I1} > 0$ и $T_{I1} > 0$. Выражение (7) соответствует ПИ-регулятору с дополнительным

фильтром первого порядка. Обозначим $d_1 = d$, $d_2 = \mu_{I1} d^{(1)}$ и представим закон управления (7) в виде системы двух дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{aligned}\mu_{I1} \dot{d}_1^{(1)} &= d_2, \\ \mu_{I1} \dot{d}_2^{(1)} &= -d_{I1} d_2 + k_{I1} \left[\left(I_{L1}^d - I_{L1} \right) / T_{I1} - I_{L1}^{(1)} \right].\end{aligned}\quad (8)$$

В результате уравнения преобразователя с регулятором (8) имеют вид

$$\begin{aligned}\dot{I}_{L1} &= \frac{E}{L_1} - \frac{1}{L_1} U_{C1} (1 - d_1), \\ \dot{U}_{C1} &= \frac{1}{C_1} U_{C1} d_1 + \frac{1}{C_1} I_{L1} (1 - d_1), \\ \dot{I}_{L2} &= -\frac{1}{L_2} U_{C1} d_1 - \frac{1}{L_2} U_{C2}, \\ \dot{U}_{C2} &= \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{RC_2} U_{C2}, \\ \mu_{I1} \dot{d}_1 &= d_2, \\ \mu_{I1} \dot{d}_2 &= -d_{I1} d_2 + k_{I1} \left[\left(I_{L1}^d - I_{L1} \right) / T_{I1} - \dot{I}_{L1} \right].\end{aligned}\quad (9)$$

Заменяя $I_{L1}^{(1)}$ в последнем уравнении системы (9) правой частью первого уравнения системы (9), получим

$$\begin{aligned}\dot{I}_{L1} &= \frac{E}{L_1} - \frac{1}{L_1} U_{C1} (1 - d_1), \\ \dot{U}_{C1} &= \frac{1}{C_1} U_{C1} d_1 + \frac{1}{C_1} I_{L1} (1 - d_1), \\ \dot{I}_{L2} &= -\frac{1}{L_2} U_{C1} d_1 - \frac{1}{L_2} U_{C2}, \\ \dot{U}_{C2} &= \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{RC_2} U_{C2}, \\ \mu_{I1} \dot{d}_1 &= d_2,\end{aligned}$$

$$\mu_{I1}\dot{d}_2 = -\frac{k_{I1}U_{C1}}{L_1}d_1 - d_{I1}d_2 + k_{I1}\left[\frac{I_{L1}^d - I_{L1}}{T_{I1}} - \frac{E}{L_1} + \frac{1}{L_1}U_{C1}\right]. \quad (10)$$

Уменьшение параметра μ_{L1} приводит к формированию разнотемповых процессов в системе (10), для анализа свойств которых можно использовать метод разделения движений. Тогда из (10) получаем подсистему быстрых движений (ПБД)

$$\begin{aligned} \mu_{I1}\dot{d}_1 &= d_2, \\ \mu_{I1}\dot{d}_2 &= -\frac{k_{I1}U_{C1}}{L_1}d_1 - d_{I1}d_2 + k_{I1}\left[\frac{I_{L1}^d - I_{L1}}{T_{I1}} - \frac{E}{L_1} + \frac{1}{L_1}U_{C1}\right], \end{aligned} \quad (11)$$

где I_{L1} , U_{C1} , I_{L1}^d и E являются замороженными переменными на время переходного процесса в (11). Полагая $k_{L1} = L_1 / (U_{C1} + \varepsilon)$, где ε – малая положительная величина, получим характеристический полином для ПБД (11) вида $\mu_{L1}^2 s^2 + d_{L1}\mu_{L1}s + 1$. В соответствии с методом разделения движений из (10) получим уравнения для ПМД вида

$$\begin{aligned} \dot{I}_{L1} &= \frac{I_{L1}^d - I_{L1}}{T_{I1}}, \\ \dot{U}_{C1} &= \left[\frac{1}{C_1} - \frac{E}{C_1 U_{C1}}\right] I_{L2} + \frac{E}{C_1 U_{C1}} I_{L1}, \\ \dot{I}_{L2} &= \frac{E}{L_2} - \frac{1}{L_2} U_{C1} - \frac{1}{L_2} U_{C2}, \\ \dot{U}_{C2} &= \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{RC_2} U_{C2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где время переходных процессов для I_{L1} задается выбором T_{I1} .

5. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ НА БУФЕРНОМ КОНДЕНСАТОРЕ

В соответствии с методом разделения движений предполагаем, что переходные процессы по току I_{L1} протекают гораздо быстрее, чем процессы по

напряжению U_{C1} . Тогда, рассматривая установившийся режим внутреннего контура $I_{L1}^d = I_{L1}$, получаем из (12) вырожденную систему вида

$$\begin{aligned}\dot{U}_{C1} &= \left[\frac{1}{C_1} - \frac{E}{C_1 U_{C1}} \right] I_{L2} + \frac{E}{C_1 U_{C1}} I_{L1}^d, \\ \dot{I}_{L2} &= \frac{E}{L_2} - \frac{1}{L_2} U_{C1} - \frac{1}{L_2} U_{C2}, \\ \dot{U}_{C2} &= \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{RC_2} U_{C2},\end{aligned}\tag{13}$$

где I_{L1}^d рассматривается как новое управляющее воздействие, формируемое регулятором C_{UC1} . Сформируем для (13) алгоритм управления вида

$$\mu_{U1}^2 (I_{L1}^d)^{(2)} + d_{U1} \mu_{U1} (I_{L1}^d)^{(1)} = k_{U1} \left[\frac{U_{C1}^d - U_{C1}}{T_{U1}} - (U_{C1})^{(1)} \right],\tag{14}$$

структура которого аналогична выражению (7). В результате анализ свойств процессов управления напряжением U_{C1} рассматривается на основе уравнений (13) и (14), при этом используется аналогичная методика разделения движений, представленная выше. Если принять $k_{U1} = C_1 U_{C1} / E$, тогда характеристический полином ПБД, получаемый из уравнений (13) и (14), имеет вид $\mu_{U1}^2 s^2 + d_{U1} \mu_{U1} s + 1$. При этом из уравнений (13) и (14) получаем уравнения ПМД вида

$$\begin{aligned}\dot{U}_{C1} &= \frac{U_{C1}^d - U_{C1}}{T_{U1}}, \\ \dot{I}_{L2} &= \frac{E}{L_2} - \frac{1}{L_2} U_{C1} - \frac{1}{L_2} U_{C2}, \\ \dot{U}_{C2} &= \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{RC_2} U_{C2}.\end{aligned}\tag{15}$$

6. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

При анализе процессов во внешнем контуре с регулятором напряжения U_{C2} предполагаем, что имеет место установившийся режим во внутреннем контуре $U_{C1}^d = U_{C1}$, тогда из (15) следует вырожденная система вида

$$\begin{aligned} \dot{I}_{L2} &= \frac{E}{L_2} - \frac{1}{L_2} U_{C2} - \frac{1}{L_2} U_{C1}^d, \\ \dot{U}_{C2} &= \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{RC_2} U_{C2}, \end{aligned} \quad (16)$$

где U_{C1}^d рассматривается как новая управляющая переменная, которая формируется с помощью интегрального регулятора вида

$$\dot{U}_{C1}^d = k_{U2} (U_{C2}^d - U_{C2}). \quad (17)$$

Характеристический полином системы (16), (17) имеет вид

$$s^3 + \frac{1}{RC_2} s^2 + \frac{1}{C_2 L_2} s - \frac{k_{U2}}{C_2 L_2}, \quad (18)$$

для устойчивости которой требуется выполнить условия

$$-\frac{1}{RC_2} < k_{U2} < 0. \quad (19)$$

В результате получаем, что для разделения темпов переходных процессов между каскадами управления требуется выполнить условия:

$$0 < \mu_{I1} < T_{I1} < \mu_{U1} < T_{U1} < 1 / \min_{i=1,2,3} |\operatorname{Re}(s_i)|, \quad (20)$$

где s_1, s_2 , и s_3 – корни характеристического полинома (18).

7. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При численном моделировании процессов были выбраны следующие значения параметров преобразователя Кука:

$$E = 15 \text{ В}, \quad L_1 = 0.02 \text{ Гн}, \quad L_2 = 0.02 \text{ Гн}, \quad C_1 = 0.005 \text{ Ф}, \quad C_2 = 0.005 \text{ Ф}, \quad R = 20 \text{ Ом}.$$

Значение периода квантования широтно-импульсного модулятора выберем как $T_s = 0.0005$ с. Тогда в соответствии с (20) величины параметров регуляторов возьмем следующими:

$$k_{U2} = -1, \quad T_{L1} = 0.02 \text{ с}, \quad \mu_{L1} = 0.00067 \text{ с},$$

$$d_{L1} = 2, \quad T_{U1} = 0.2 \text{ с}, \quad \mu_{U1} = 0.01 \text{ с}, \quad d_{U1} = 2.$$

Моделирование обсуждаемого преобразователя было выполнено на основе модели (1) и (5) с регуляторами (7), (14) и (17) с помощью пакета Matlab/Simulink. Результаты моделирования представлены на рис. 3, которые были получены при ступенчатых изменениях величин сопротивления нагрузки R и входного напряжения E следующего вида:

$$R(t) = 20 - 10 \cdot 1(t - 10), \quad E(t) = 15 + 15 \cdot 1(t - 14).$$

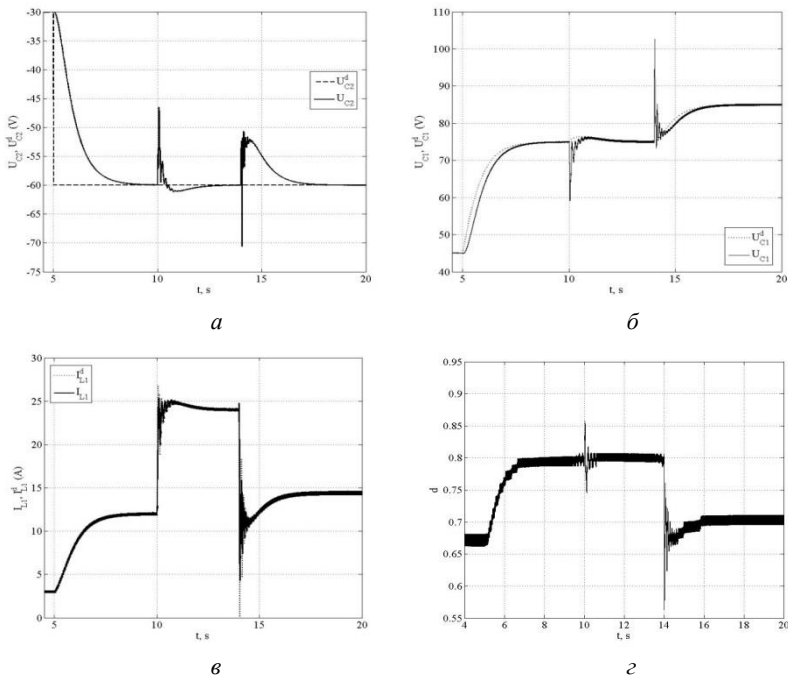


Рис. 3. Результаты моделирования процессов в системе управления

Из результатов моделирования видно, что в системе обеспечивается подавление влияния внешних возмущений после завершения переходных процессов.

ВЫВОДЫ

Предлагаемая методика синтеза системы управления для преобразователя Кука позволяет обеспечить формирование желаемых показателей качества переходных процессов в системе и подавить влияние переменных величин входного напряжения и сопротивления нагрузки. Получены аналитические выражения для выбора параметров регулятора в зависимости от желаемых показателей качества переходного процесса в системе управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 671 с.
2. Erickson R.W. Fundamentals of power electronics. – [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2013. – 773 p.
3. Kislovski A., Redl R., Sokal N.O. Dynamic analysis of switching-mode DC/DC converters. – [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012. – 404 p.
4. Kazimierczuk M.K. Pulse-width modulated DC-DC power converters. – Chichester: John Wiley & Sons, 2008. – 782 p.
5. Cuk S., Middlebrook R.D. A new optimum topology switching dc-to-dc converter // Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'77, 14–16 June 1977, Palo Alto, California. – New York: IEEE, 1977. – P. 160–179.
6. Cuk S. A new zero-ripple switching dc-to-dc converter and integrated magnetics // Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'80, Atlanta, Georgia, 16–20 June 1980. – New York: IEEE, 1980. – P. 12–32.
7. Knight J., Shirsavar S., Holderbaum W. An improved reliability Cuk based solar inverter with sliding mode control // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – Vol. 21, iss. 4. – P. 1107–1115.
8. Sira-Ramirez H., Silva-Ortigoza R. Control design techniques in power electronics devices. – London: Springer-Verlag, 2006. – 441 p.
9. Utkin V., Guldner J., Shi J.-X. Sliding mode control in electro-mechanical systems. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 503 p.

10. Ryvkin S., Himmelstoss F.A. Control problem of a novel low-voltage DC converter // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2012. – Vol. 32, iss. 1. – P. 220–232.
11. Chen Z. PI and sliding mode control of a Cuk converter // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27, iss. 8. – P. 3695–3703.
12. Yurkevich V.D. Design of controller for buck-boost converter // Proceedings of 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS–2005, Novosibirsk, Russia, 26 June – 2 July 2005. – Novosibirsk, 2005. – P. 741–745.
13. Yurkevich V.D. PWM controller design based on singular perturbation technique: a case study of buck-boost DC-DC converter // Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, 28 August – 2 September 2011. – Milan, 2011. – P. 9739–9744. – doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00963.
14. Yurkevich V D., Zinoviev G.S., and Gordeev A.A. PWM Current Controller Design for Multi-level DC-DC Converter via Singular Perturbation Technique // The 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2011), Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2011. – Novosibirsk, 2011. – P. 390–398.
15. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. – М.: Наука, 1985. – 255 с.
16. Sira-Ramirez H. A geometric approach to pulse-width-modulated control in nonlinear dynamical systems // IEEE Transactions Automatic Control. – 1989. – Vol. 34, iss. 2. – P. 184–187.

Аксенов Ефим Андреевич, магистрант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: управление в технических системах, импульсные преобразователи напряжения, силовая электроника. Имеет 2 публикации. E-mail: efimke54@gmail.com

Юркевич Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: системы автоматического управления, импульсные преобразователи напряжения, метод разделения движений в задачах управления. Имеет более 200 публикаций. E-mail: yurkev@ac.cs.nstu.ru

Design of Cascaded Control System for a Cuk Converter*

E.A. Aksenov¹, V.D. Yurkevich²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master student. E-mail: efimke54@gmail.com

² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor of the automation department. E-mail: yurkev@mail.ru

Switching power converters are widely used in order to provide output voltage stabilization of direct current off-line supply sources. There is huge set of DC-DC pulse converters, particularly, Cuk converters are frequently used. The distinctive feature of Cuk converters is the low level of high frequency noise which is generated by converter due to its switching operation. However, complicated dynamics and slow-scale oscillations are inherent properties of Cuk converters. Therefore, the problem of controller design for Cuk converters gives an appropriate example of a high nonlinear dynamical system and allows demonstrating efficiency of different controller design methodology. There is a set of papers where sliding mode control is used for Cuk converters. The distinctive feature of this paper is that time-scale separation technique is used in order to controller design. Cascaded control system design for the Cuk converter is discussed where control system consists of three feedback loops. In the first one the input current control is provided by means of pulse-width modulated (PWM) proportional-integral (PI) controller. In the second one the voltage across capacitor for transferring energy is regulated by PI controller. Finally, in the third one the voltage across capacitor for storing energy is maintained by integral (I) controller. The both PI controllers are designed based on singular perturbation technique (time-scale separation technique) such that multi-time-scale motions are artificially induced in the closed-loop system. Numerical simulations are included in order to show the efficiency of the proposed design methodology.

Keywords: DC-DC converters, switching converter, Cuk converter, power electronics, pulse-width modulation, PI controller, control, nonlinear system, singular perturbation method

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-7-20

REFERENCES

1. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2009. 671 p.
2. Erickson R.W. *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media, 2013. 773 p.
3. Kislovski A., Redl R., Sokal N.O. *Dynamic analysis of switching-mode DC/DC converters*. Springer Science & Business Media, 2012. 404 p.
4. Kazimierczuk M.K. *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. Chichester, John Wiley & Sons, 2008. 782 p.
5. Cuk S., Middlebrook R.D. A new optimum topology switching dc-to-dc converter. *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference*

* Received 29 July 2015.

PESC'77, Palo Alto, California, 14–16 June 1977, pp. 160–179.

6. Cuk S. A new zero-ripple switching dc-to-dc converter and integrated magnetics. *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'80*, Atlanta, Georgia, 16–20 June 1980, pp. 12–32.

7. Knight J., Shirsavar S., Holderbaum W. An improved reliability Cuk based solar inverter with sliding mode control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, vol. 21, iss. 4, pp. 1107–1115.

8. Sira-Ramirez H., Silva-Ortigoza R. *Control design techniques in power electronics devices*. London, Springer-Verlag, 2006. 441 p.

9. Utkin V., Guldner J., Shi J.-X. *Sliding mode control in electro-mechanical systems*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2009. 503 p.

10. Ryvkin S., Himmelstoss F.A. Control problem of a novel low-voltage DC converter. *COMPEL. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2012, vol. 32, iss. 1, pp. 220–232.

11. Chen Z. PI and sliding mode control of a Cuk converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, iss. 8, pp. 3695–3703.

12. Yurkevich V.D. Design of controller for buck-boost converter. *Proceedings of 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS-2005*, Novosibirsk, Russia, 26 June – 2 July 2005, pp. 741–745.

13. Yurkevich V.D. PWM controller design based on singular perturbation technique: a case study of buck-boost DC-DC converter. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, Milan, Italy, 28 August – 2 September 2011, pp. 9739–9744. doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00963

14. Yurkevich V.D., Zinoviev G.S., and Gordeev A.A. PWM current controller design for multi-level DC-DC converter via singular perturbation technique. *The 12th Annual International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2011*, Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2011, pp. 390–398.

15. Filippov A.F. *Differentsial'nye uravneniya s razryvnoi pravoi chast'yu* [Differential equations with discontinuous right hand sides]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 255 p.

16. Sira-Ramirez H. A geometric approach to pulse-width-modulated control in nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions Automatic Control*, 1989, vol. 34, iss. 2, pp. 184–187.