

# СИГНАЛЬНЫЙ ПРОЦЕССОР В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШАЮЩИМ КВАЗИРЕЗОНАНСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

В.П.Войтенко, М.А.Хоменко

Черниговский государственный технологический университет

Кафедра промышленной электроники, ул. Шевченко, 95, 14027, г. Чернигов, Украина

Черниговский государственный технологический университет,

Тел. (04622) 316-96, E-mail: vvp@inel.stu.cn.ua, mr.homax@gmail.com

**Annotation** – Space vectors in the quasi-resonant pulse converter switched at a zero current are defined. Advantages of the digital signal processor and high level programming conception in advanced control systems for quasi-resonant pulse converters are formulated and demonstrated.

**Key words** – digital signal processor, quasi-resonant pulse converter, advanced control.

## ВВЕДЕНИЕ

Решение задач снижения энергопотребления, сформулированных в новом плане энергоэффективности, разработанном Европейской Комиссией, предполагает все более широкое внедрение систем энергетической электроники [1]. Совершенствование этих систем лежит в плоскостях повышения частоты преобразования электроэнергии, лучшей топологии, продвинутого управления и др. Для маломощных систем электропитания в данный контекст хорошо вписываются квазирезонансные импульсные преобразователи (КРИП), наиболее полно классифицированные в [2]. Развитие этого класса импульсных преобразователей энергии продолжается, подтверждением чему служит ряд свежих публикаций [3 – 5].

Перспективным следует считать использование КРИП в системах точного регулирования, поскольку достигаемые высокие частоты преобразования, помимо снижения габаритов устройства, позволяют также улучшить динамические характеристики системы за счет уменьшения постоянных времени фильтрующих цепей.

В этих системах КРИП может рассматриваться в качестве звена системы управления с соответствующими параметрами. Это в перспективе позволяет реализовать продвинутые алгоритмы регулирования, например [6].

В [7] предложен подход, позволивший наглядно представить элементы КРИП,

переключаемого при нулевом напряжении, в качестве звеньев системы в пространстве состояния, что стало фундаментом для построения оптимальных регуляторов в замкнутых системах автоматического управления. Вместе с тем, в известных работах отсутствует информация, касающаяся других перспективных импульсных преобразователей, в частности – повышающих КРИП.

Важной проблемой является также разработка прикладного программного обеспечения, которая все в большей степени становится трудоемкой задачей. Ее решение может быть существенно облегчено за счет использования систем высокоуровневого программирования.

Цель данной работы – определение переменных состояния и синтез системы управления высокого уровня для повышающего квазирезонансного преобразователя, переключаемого при нулевом токе (КРИП-ПНТ).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКТОРОВ СОСТОЯНИЯ В КРИП-ПНТ

Упрощенная функциональная схема исследуемого КРИП-ПНТ показана на Рис. 1.

Здесь опорными элементами контура, определяющими резонансный процесс, являются  $C_r$  и  $L_r$ , а ключ  $S_1$  в двухполупериодной схеме реализуется на МОП-транзисторе, между стоком и истоком которого обратно включен защитный диод.

В [2] приведен упрощенный анализ понижающего КРИП-ПНТ, причем преобразователь представлен в виде генератора постоянного тока, питающего нагрузку, которая замещена источником постоянного напряжения. При построении точных систем питания и управления, в которых предъявляются высокие требования к динамическим характеристикам, а также электромагнитной совместимости и массо-габаритным показателям, требуются расчетные соотношения, учитывающие конечные значения номиналов компонентов схемы (накопительного дросселя  $L1$ , сглаживающего конденсатора  $Cf$  и др.).

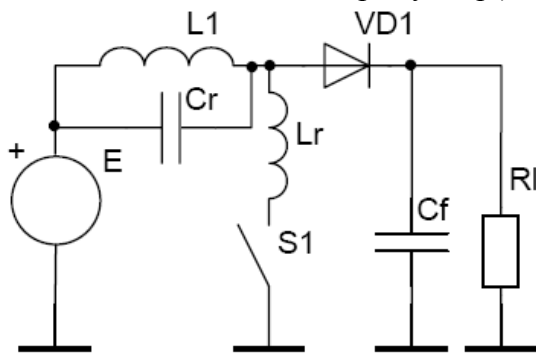


Рис. 1

Полный период частоты переключения в установившемся режиме можно разделить на четыре интервала, начиная с момента замыкания ключа  $S1$ . Поскольку на каждом из интервалов эквивалентная схема КРИП-ПНТ представляет собой линейную стационарную систему, она может быть описана совокупностью линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами, которую можно представить в следующей векторно-матричной форме [8]:

$$\frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{v}(t), \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица коэффициентов;

$\mathbf{v}(t)$  – вектор-столбец состояния системы увеличенной размерности. Для повышающего КРИП-ПНТ этот вектор представлен (2), причем:

$i_{L1}, i_{Lr}$  – токи через индуктивности  $L1$  и  $Lr$ , соответственно;

$u_{Cr}, u_{Cf}$  – напряжения на конденсаторах  $Cr$  и  $Cf$ .

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} E \\ i_{L1} \\ u_{Cr} \\ i_{Lr} \\ u_{Cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Решения уравнений состояния (1) находятся в форме:

$$\mathbf{v}(t) = \Phi(t)\mathbf{v}(0^+), \quad (3)$$

где  $\Phi(t)$  – расширенная матрица перехода системы;

$\mathbf{v}(0^+)$  – вектор начальных условий.

Вычисление  $\Phi(t)$  можно произвести по следующему алгоритму:

$$\Phi(t) = L^{-1} \{ [p\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Последовательно выполним анализ КРИП-ПНТ на каждом из четырех интервалов периода переключения с целью определения исходных данных для применения процедуры (1) – (4).

**ПЕРВЫЙ ИНТЕРВАЛ** (интервал заряда дросселя  $L1$ ). Начинается в момент времени  $t_0$ , совпадающий с замыканием силового ключа  $S1$  и протеканием через него положительной полуволны резонансного тока. Эквивалентная схема КРИП-ПНТ представлена на Рис. 2.

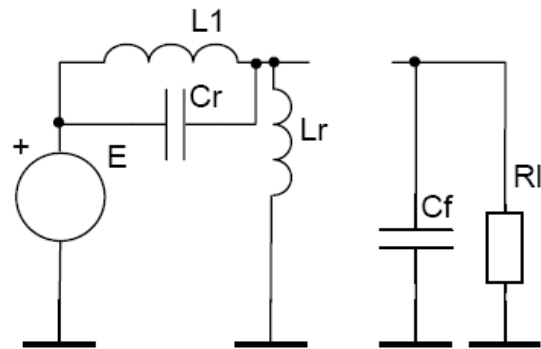


Рис. 2

Из этой схемы установлена взаимосвязь между напряжениями и токами в КРИП на первом интервале:

$$u_{L1} = L1 \frac{di_{L1}}{dt} = u_{Cr};$$

$$\begin{aligned}
 i_{L1} + i_{Cr} &= i_{L1} + Cr \frac{du_{Cr}}{dt} = i_{Lr}; \\
 u_{Cr} + u_{Lr} &= u_{Cr} + Lr \frac{di_{Lr}}{dt} = E; \\
 u_{Cf} &= -i_{Cf} Rl = -RlCf \frac{du_{Cf}}{dt},
 \end{aligned}$$

откуда следует:

$$\frac{dv}{dt} = \begin{bmatrix} 0 \\ x_2/L1 \\ (-x_1 + x_3)/Cr \\ (E - x_2)/Lr \\ -x_4/(RlCf) \end{bmatrix}; \quad v(t_0) = \begin{bmatrix} E \\ i_{L1}(t_0) \\ u_{Cr}(t_0) \\ 0 \\ u_{Cf}(t_0) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

**ВТОРОЙ ИНТЕРВАЛ** (интервал обратной полуволны тока дросселя  $Lr$ ). Начинается в момент времени  $t_1$ , совпадающий с началом пропускания тока защитным диодом силового ключа  $SI$ . Эквивалентная схема аналогична Рис. 2.

Для этого интервала векторы состояний и начальных условий определяются аналогично (5):

$$\frac{dv}{dt} = \begin{bmatrix} 0 \\ x_2/L1 \\ (-x_1 + x_3)/Cr \\ (E - x_2)/Lr \\ -x_4/(RlCf) \end{bmatrix}; \quad v(t_1) = \begin{bmatrix} E \\ i_{L1}(t_1) \\ u_{Cr}(t_1) \\ 0 \\ u_{Cf}(t_1) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

**ТРЕТИЙ ИНТЕРВАЛ** (интервал линейного заряда конденсатора контура  $Cr$  током дросселя  $L1$ ). Начинается в момент времени  $t_2$ , совпадающий с прекращением пропускания тока силовым ключом  $SI$ . Эквивалентная схема КРИП-ПНТ представлена на Рис. 3.

Для этого интервала векторы состояний и начальных условий определяются выражением (7).

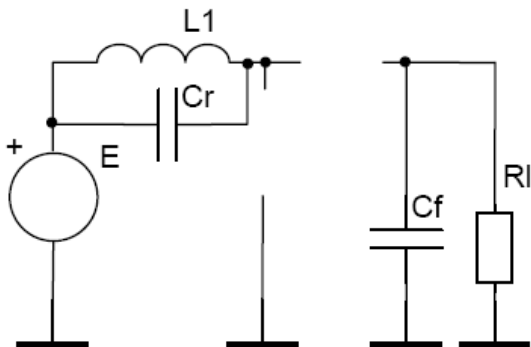


Рис. 3

$$\frac{dv}{dt} = \begin{bmatrix} 0 \\ x_2/L1 \\ -x_1/Cr \\ 0 \\ -x_4/(RlCf) \end{bmatrix}; \quad v(t_2) = \begin{bmatrix} E \\ i_{L1}(t_2) \\ u_{Cr}(t_2) \\ 0 \\ u_{Cf}(t_2) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

**ЧЕТВЕРТЫЙ ИНТЕРВАЛ** (интервал подзаряда конденсатора фильтра  $Cf$  током дросселя  $L1$ ). Начинается в момент времени  $t_3$ , совпадающий с отпирианием диода  $VD1$ . Упрощенная эквивалентная схема КРИП-ПНТ представлена на Рис. 4.

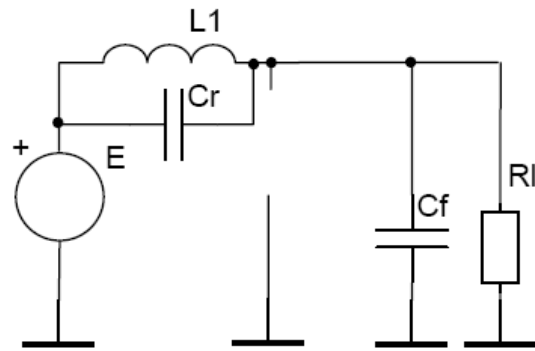


Рис. 4

Для этого интервала векторы состояний и начальных условий определяются выражением (8):

$$\frac{dv}{dt} = \begin{bmatrix} 0 \\ x_2/L1 \\ 0 \\ 0 \\ (x_1 - x_4/Rl)/Cf \end{bmatrix}; \quad v(t_3) = \begin{bmatrix} E \\ i_{L1}(t_3) \\ u_{Cr}(t_3) \\ 0 \\ u_{Cf}(t_3) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Выражения (5)...(8) позволяют легко определить матрицы коэффициентов для каждого из интервалов, а далее вычислить переменные состояния с целью использования в управляющих алгоритмах. Следует также отметить, что при практической реализации системы управления средствами микропроцессорной техники определенные преимущества получают процессоры цифровой обработки сигналов, архитектурные особенности которых позволяют повысить эффективность реализации наблюдателей состояний.

#### СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ И ВЫСОКОУРОВНЕВОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

Вследствие существенной нелинейности импульсных преобразователей, а так-

же усложнения схемотехники традиционные теоретические подходы к их анализу и проектированию все в большей степени утрачивают свое значение, поскольку приводят к громоздким формульным выражениям, которые не находят практического применения. Разумной альтернативой является компьютерное моделирование, в частности – с использованием среды *MATLAB+Simulink*, а также таких расширений, как *powergui* и др.

В силу особенностей работы импульсных ключей, и, принимая во внимание их непосредственное взаимодействие с реальными объектами, целесообразно применение такого программного расширения *Simulink*, как *Simscape*, которое позволяет моделировать многодоменные физические системы, содержащие механические, гидравлические, пневматические, тепловые, электрические и электромагнитные компоненты, представляя физические компоненты или отношения прямым образом. Пакет расширения *SimElectronics* работает совместно с *Simscape* и открывает возможности физического моделирования электромеханических и электронных систем.

Программное обеспечение *Sim Power Systems* также, как и другие продукты семейства инструментов физического моделирования, взаимодействует с *Simulink*, что позволяет моделировать электрические и механические системы, а также системы управления. Библиотека *Sim Power Systems* специально предназначена для моделирования некоторых полупроводниковых приборов средствами *Simulink*. К сожалению, данные модели не позволяют проанализировать особенности поведения импульсного преобразователя с достаточной достоверностью. Чтобы не прибегать к использованию внешних программ низкого уровня моделирования электронных компонентов (*Cadence*, например), можно использовать библиотеку *Simscape/Additional Components/SPICE-Compatible Components*.

На Рис. 5 приведены результаты моделирования КРИП (временные диаграммы

переменных состояния из предыдущего раздела), в котором использованы компоненты со следующими характеристиками:

$E=7\text{ В}; L1=100\text{ мкГн}; Cr=60\text{ нФ}; Lr=0,61\text{ мкГн}; Cf=100\text{ мкФ}; S1 - BUZ10; VDI - IN5822.$

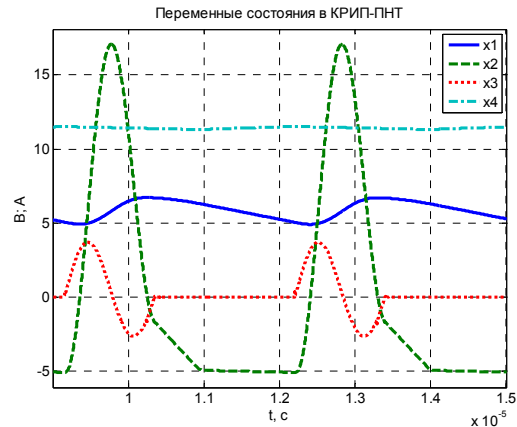


Рис. 5

Актуальной элементной базой систем управления, в первую очередь, являются микроконтроллеры. Схемотехника в этом случае, как правило, стандартна и не представляет сложности. Разработка же прикладного программного обеспечения требует огромных затрат времени и узкой специализации разработчика. Эта специализация теряет смысл вследствие быстрой эволюции встраиваемых микроконтроллеров в направлении повышения производительности, объема резидентной памяти и номенклатуры встроенных периферийных устройств. Параллельно идет процесс развития интегрированных средств разработки программного обеспечения, расширения их номенклатуры для каждого из актуальных на рынке семейства микроконтроллеров. В итоге разработчик промышленной системы управления стоит перед необходимостью решения массы задач, предваряющих активную фазу проектирования. В частности, необходимо:

- 1) выбрать семейство микроконтроллеров из множества, представленных на рынке;
- 2) выбрать соответствующую среду разработки программного обеспечения;
- 3) выбрать конкретный микроконтроллер в семействе, потенциально способный

решить поставленную задачу;

4) изучить техническую документацию на выбранный микроконтроллер;

5) изучить документацию и освоить приемы работы с выбранной средой разработки.

После длительного процесса разработки алгоритма и отладки программного обеспечения может оказаться, что имеющимися средствами задачу решить невозможно, и один из предшествующих неправильно сделанных шагов следует повторить.

Комплексное решение задачи создания прототипа системы управления импульсным преобразователем на микроконтроллере может быть выполнено с помощью аппаратных средств отладки программного обеспечения, поддерживающих интерфейс с *MATLAB+Simulink*. Пакет *Target Support* дает возможность передавать код, сгенерированный продуктами *MathWorks*, для выполнения в реальном времени на встраиваемых микропроцессорах, микроконтроллерах и сигнальных микропроцессорах. Использование данного пакета позволяет интегрировать периферийные устройства и операционные системы реального времени с алгоритмами, созданными с помощью *Simulink*-моделей, диаграмм *Stateflow* и языкового подмножества встраиваемого *MATLAB*, не разрабатывая драйверы низкого уровня и программы, работающие в реальном времени. Полученный исполнимый программный модуль может быть запущен на встраиваемых аппаратных средствах с целью быстрого макетирования, анализа производительности в реальном времени, настройки на реальном объекте.

В настоящее время данный пакет поддерживает более 50 популярных семейств процессоров, а также отладочные платы для *Blackfin (Analog Devices)*, *MPC5xx (Freescale)*, *C166 (Infineon)*, *C2000/C5000/C6000 (Texas Instruments)*.

Начиная с *MATLAB* версии R2011b *Target Support* был встроен в пакет *Embedded Coder*, который генерирует читаемый, компактный и быстрый код на язы-

ках C и C++ для использования во встраиваемых процессорах на целевых макетных платах, а также для микропроцессоров, используемых в массовом производстве.

На Рис. 6 представлен результат разработки прототипа системы управления повышающим КРИП малой мощности с использованием целевой платы *eZdsp TMS320F2812 (Spectrum Digital)*, в которой использован сигнальный процессор фирмы *Texas Instruments* и которая поддерживается *MATLAB*. Высокая производительность и специальные резидентные аппаратные средства сигнального микроконтроллера открывают возможности реализации продвинутых алгоритмов управления импульсным ключом [6 и 9].

*Simulink*-модель содержит узлы, позволяющие задать режимы резидентных АЦП и ШИМ и организовать связь с *MATLAB* (блоки *To RTDX* и *From RTDX*). Цифровой регулятор в данном случае реализован в виде *Simulink*-блока *PID Controller*.

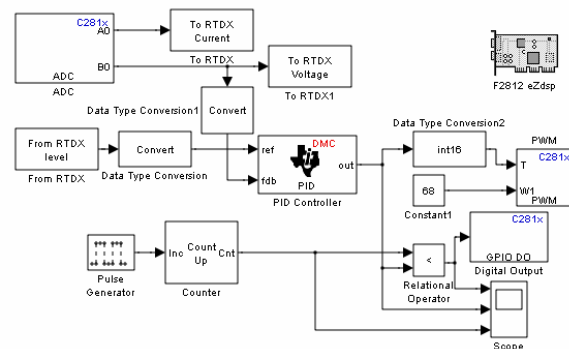


Рис. 6

После создания и отладки модели в режиме симуляции производится автоматическая генерация исходного текста программы на языке C средствами *MATLAB* и передача его в интегрированную среду разработки программного обеспечения сигнальных процессоров *Code Composer*. Далее автоматически запускается пакетный файл, транслирующий код из *MATLAB* и загружающий объектный модуль в память программ целевой платы. Последующая работа производится в режиме реального времени.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки предложенной выше концепции разработки системы управления КРИП на базе сигнального процессора был создан лабораторный макет Рис. 7, с компонентами, аналогичными Рис. 5.



Рис. 7

Программное обеспечение разработано и отлажено в соответствии с описанной выше процедурой, т.е. практически без низкоуровневой работы с текстом автоматически сгенерированной *MATLAB* программы. Это позволило существенно сократить сроки разработки прототипа, повысить наглядность и оптимизировать систему управления. На Рис. 8 представлены снятые осциллограммы тока ключа и управляющего сигнала.

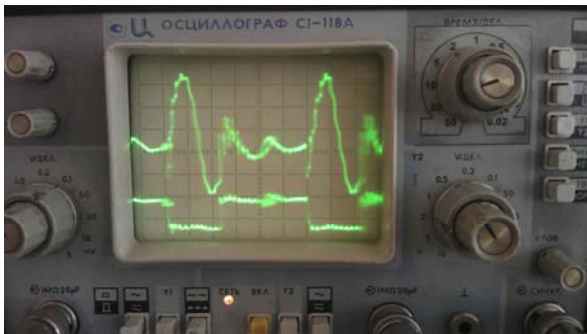


Рис. 8

Экспериментальные данные продемонстрировали очевидную схожесть характера динамических процессов в системе управления, содержащей КРИП и правильность подхода к высокоуровневому программированию сигнального процессора. Кроме того, они позволили уточнить параметры, а также усовершенствовать структуру модели.

## ВЫВОДЫ

1. Определены вектора состояния для четырех коммутационных интервалов по-

вышающего КРИП, которые могут быть использованы для реализации эффективного алгоритма управления.

2. Построены *Simscape*-модели и сформулирована концепция сквозного высокоуровневого проектирования аппаратных и программных средств системы управления КРИП, позволяющая существенно сократить сроки разработки.

3. Экспериментально подтверждена возможность высокоуровневой разработки и отладки прикладного программного обеспечения встраиваемой системы управления КРИП.

[1] Popović-Gerber J., Oliver J.A., Cordero N., Harder T., Cobos J.A., Hayes M., O'Mathuna S.C., Prem E. Power Electronics Enabling Efficient Energy Usage: Energy Savings Potential and Technological Challenges// *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 5, pp. 2338– 629, May 2353.

[2] Ли Ф.К. Высокочастотные квазирезонансные преобразователи// *ТИИЭР.* – 1988.– Т. 76, №4.– С. 83 – 97.

[3] Jayashree E., Uma G. Design and implementation of zero-voltage switching quasi-resonant positive-output Luo converter using analog resonant controller UC3861// *IET Power Electron.*, 2011, Vol. 4, Iss. 1, pp. 81–88.

[4] Ko Y.-P., Y.-S. Lee W.-H. Chao. Analysis, design and implementation of fuzzy logic controlled quasi-resonant zero-current switching switched-capacitor bidirectional converter// *IET Power Electron.*, 2011, Vol. 4, Iss. 6, pp. 683–692.

[5] Jayashree E., Uma G. Analysis, design and implementation of a quasi-resonant DC–DC converter// *IET Power Electron.*, 2011, Vol. 4, Iss. 7, pp. 785 – 792.

[6] Войтенко В.П. Квазиоптимальное регулирование в промышленной системе с импульсным ключом// *Технічна електродинаміка*, 2011. – С. 171 – 175. – (Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність», ч. 2).

[7] Войтенко В.П., Денисов Ю.А. Определение векторов состояния в квазирезонансном импульсном преобразователе, переключаемом при нулевом напряжении// *Технічна електродинаміка*, 2001. – С. 23 – 26. – (Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність», ч. 1).

[8] Ту Ю. Современная теория управления: Пер. с англ. Я.Н.Гибадулина, под ред. В.В.Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1971. – 472 с.

[9] Войтенко В.П. Квазиоптимальные промышленные регуляторы с автоматической параметрической идентификацией// *Технічна електродинаміка*, 2004. – С. 85 – 90. – (Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність», ч. 3).