

УДК 621.314.52

Якименко Игорь Владимирович

доктор технических наук

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Россия

Каршибоев Шароф Абдураупович

в.б. доцент кафедры «Радиоэлектроника»

Джизакский политехнический институт, Узбекистан

ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ

ОБРАТНОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Аннотация. В работе представлена методика синтеза обобщенной непрерывной модели обратноходового преобразователя, применимой для режимов непрерывного и прерывистого тока индуктивного накопителя. Полученные зависимости позволяют проводить разработку систем управления обратноходовыми, инвертирующими и последовательно-параллельными преобразователями, а также использовать методику при проектировании непрерывных моделей повышающих и понижающих топологий.

Ключевые слова: непрерывная модель, метод усреднения, обратноходовой преобразователь, управление, индуктивность намагничивания.

Yakimenko Igor Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences

Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (NRU “MPEI”), Russia

Karshiboev Sharof Abduraupovich

Acting Associate Professor, Department of “Radio Electronics”

Jizzakh Polytechnic Institute, Uzbekistan

DEVELOPMENT OF A GENERALIZED CONTINUOUS MODEL

OF A FLYBACK CONVERTER

Abstract. The paper presents a method for synthesizing a generalized continuous model of a flyback converter, applicable to both continuous and discontinuous conduction modes of the magnetic storage inductor. The obtained relationships make it possible to design control systems for flyback, inverting, and series-parallel converters, as well as to use the method in the development of continuous models for boost and buck topologies.

Keywords: continuous model, averaging method, flyback converter, control, magnetizing inductance.

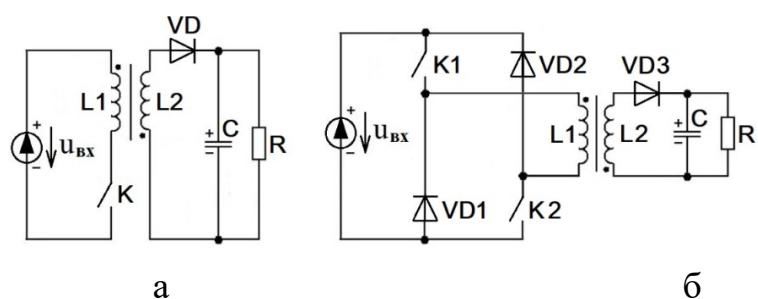
1. Введение

Обратноходовые преобразователи широко применяются в импульсных источниках питания благодаря простоте конструкции, гальванической развязке и возможности работы в широком диапазоне нагрузок. Однако сложность электромагнитных процессов при коммутации затрудняет разработку точных систем управления. Для решения этой проблемы используется метод усреднения в пространстве состояний, позволяющий получить непрерывные модели для различных режимов работы.

2. Методика

2.1. Исходные схемы и допущения

Рассматриваются два варианта реализации преобразователя — одноключевой и двухключевой (рис. 1). Для упрощения используется модель, в которой трансформатор представляется идеальным трансформатором и индуктивностью намагничивания LM [1].



**Рисунок 1 – Варианты реализации обратноходового преобразователя:
одноключевой (а) и двухключевой (б)**

При моделировании принимаются допущения:

- отсутствуют паразитные параметры элементов;
- выполняется вольт-секундный баланс;
- пульсации выходного напряжения пренебрежимо малы.

Связь токов и напряжений трансформатора задаётся выражением (1):

$$K_{TP} = \frac{u_{L1}}{u_{L2}} = \frac{i_{L2}}{i_{L1}}, \quad (1)$$

2.2. Интервалы коммутационного цикла

1. Коммутационный период состоит из:

- интервала импульса (ключ проводит, происходит накопление энергии);
- интервала паузы (ключ закрыт, энергия передаётся в нагрузку);
- интервала отсечки (только в РПТ; ток в цепях отсутствует).

2.3. Уравнения для режимов РНТ и РПТ

Для каждого из интервалов составлены уравнения напряжения на индуктивности LM:

$$\begin{cases} u_{L_M} \Big|_{d1} = u_{BX} \\ u_{L_M} \Big|_{d2} = -u_C \cdot K_{TP}, \\ u_{L_M} \Big|_{1-d1-d2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где u_{L_M} – напряжение на индуктивности намагничивания, u_{BX} – входное напряжение, $d_1, d_2, (1 - d1 - d2)$ – относительные длительности интервалов импульса, паузы, отсечки соответственно, C – емкость конденсатора, u_C – напряжение на конденсаторе, R – сопротивление нагрузки.

Среднее напряжение LM за период:

$$u_{L_M} \Big|_{CP} = d_1 \cdot u_{BX} - d_2 \cdot K_{TP} \cdot u_C \quad (3)$$

Аналогично методом усреднения получено выражение для конденсатора:

$$C \cdot \frac{du_C}{dt} \Big|_{CP} = d_2 \cdot i_{L2_P} - \frac{u_C}{R} \quad (4)$$

В РПТ ток индуктивности намагничивания на интервале паузы уменьшается от максимального значения до нуля, средний ток индуктивности намагничивания на интервале паузы определяется выражением:

$$i_{L_M_P} = \frac{I_{L_M_MAX}}{2} \quad (5)$$

Соотношение для усредненного на периоде коммутации тока конденсатора будет иметь следующий вид:

$$C \cdot \frac{du_C}{dt} \Big|_{CP} = i_{L_M_CP} \cdot \frac{d_2}{d_1 + d_2} \cdot K_{TP} - \frac{u_C}{R} \quad (6)$$

Приведенные выше результаты могут быть использованы для синтеза систем управления обратноходового, инвертирующего, последовательно-параллельного преобразователей [2]. Предложенная методика может быть использована для синтеза непрерывных моделей и проектирования систем управления понижающих и повышающих топологий.

3. Результаты

Путём применения метода усреднения получена непрерывная нелинейная модель обратноходового преобразователя, позволяющая:

- рассчитывать токи и напряжения на всех интервалах коммутационного цикла;
- определять максимальные токи индуктивности в РПТ;
- вычислять коэффициенты заполнения импульса и паузы;
- определять средние значения токов и напряжений для последующего синтеза регуляторов [3].

4. Обсуждение

Полученная модель универсальна, поскольку:

- основана на методе усреднения в пространстве состояний;
- учитывает работу обеих топологий — одноключевой и двухключевой;
- корректно отражает динамику преобразователя при изменении нагрузки;
- применима в системах управления различной сложности.

Важной особенностью является то, что модель позволяет проводить синтез регуляторов без необходимости раздельного анализа режимов РНТ и РПТ — они объединены общими уравнениями.

5. Заключение

Разработана и обоснована обобщенная непрерывная модель обратноходового преобразователя, применимая для всех основных режимов работы. Модель может использоваться для проектирования систем управления обратноходовыми, последовательно-параллельными и инвертирующими преобразователями, а также в повышающих и понижающих топологиях.

Литература

1. Якименко, И., Муртазин, Э., & Каршибоев, Ш. (2025). БУДУЩЕЕ РЕЗОНАНСНЫХ ИНВЕРТОРОВ В КОНТЕКСТЕ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ. *Экономика и социум*, (1-2 (128)), 916-919.
2. Дрозденский, С., Муртазин, Э., & Каршибоев, Ш. (2025). РОЛЬ РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА В ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ. *Экономика и социум*, (1-2 (128)), 636-639.

3. Дрозденский, С., Каршибоев, Ш., & Муртазин, Э. (2024). МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, В ПАССИВНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ. *Экономика и социум*, (2-1 (117)), 983-987.