

ТРЕХУРОВНЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ШИП

*Розглянуто можливі побудови трирівневих ШИП з використанням в якості одного з вихідних дворівневих перетворювачів ШИП типу *buck* та аналіз їх основних властивостей і регулювальних характеристик.*

Введение. В бортовых системах электропитания зачастую при наличии двухуровневых источников постоянного тока возникает потребность в секционированных источниках постоянного тока, например, из-за применения многоуровневых автономных инверторов напряжения, которые обладают, как известно, улучшенными энергетическими показателями [1–3]. К примеру, в [1, 3] рассмотрены возможности построения трехуровневых ШИП на основе комбинированного использования исходных двухуровневых ШИП и предложено несколько вариантов их построения.

При анализе их свойств особо отмечено требование исключения интерактивных влияний преобразователей, что вызывает обычно понижение их стабилизационных свойств. Традиционно для построения трехуровневых ШИП используются два типа ШИП, которые относятся к преобразователям с управляемым обменом электрической энергией между реактивными элементами. Это ШИП, имеющие возможность только повышать (англ.: *boost converter*) выходное напряжение относительно величины напряжения питания преобразователя, а также ШИП понижающие–повышающие выходное напряжение (англ.: *buck–boost converter*).

Однако далее не была учтена возможность использования в составе трехуровневого ШИП в качестве исходного – конвенционального ШИП типа *buck*, который отличается простотой построения, управления и настройки.

Рассмотрим возможность построения трехуровневых ШИП с использованием в качестве одного из исходных двухуровневых преобразователей конвенционального ШИП типа *buck*. Проанализируем их основные свойства и регулировочные характеристики.

Описание преобразователей. На рис. 1 показана схема преобразователя, предложенная в [1]. Преобразователь состоит из двух исходных ШИП, в котором первый выполнен по схеме преобразователя типа *boost*, а второй – по схеме ШИП *buck–boost* (которому присвоим сокращенное название – преобразователь *b+bb*).

Трехуровневый ШИП построен с использованием двух двухуровневых исходных ШИП, которые состоят соответственно из элементов L_1, T_1, D_1, C_1 и L_2, T_2, D_2, C_2 . Индекс «1» использован для обозначения элементов 1-го исходного преобразователя, а индекс «2» – для обозначения элементов 2-го исходного преобразователя. Выходные цепи исходных преобразователей являются подобными и содержат отсекающие диоды и включенные последовательно с ними накопительные конденсаторы C_1 и C_2 . К выходным зажимам 1, N , 2 подключены две нагрузки Z_1 и Z_2 с активно-индуктивным характером.

Так как в преобразователе *b+bb* входные цепи 1- и 2-го исходных ШИП включены параллельно между собой относительно зажимов источника питания U_{dc} , то цепи заряда и разряда дросселей L_1 и L_2 не пересекаются между собой. В результате исключается интерактивное взаимодействие исходных ШИП.

Несмотря на то, что второй исходный ШИП состоит также из четырех элементов, как и первый исходный, он однако имеет иную структуру построения. По сравнению с первым ШИП, во втором транзистор T_2 находится не в продольной, а в поперечной ветви преобразователя, а дроссель L_2 – в продольной ветви. Индуктивность L_2 , как и индуктивность L_1 в первом ШИП, является элементом, осуществляющим накопление и передачу энергии от источника к накопительному конденсатору C_2 (C_1). Поэтому в целом принципы работы исходных ШИП *boost* и *bb* подобны.

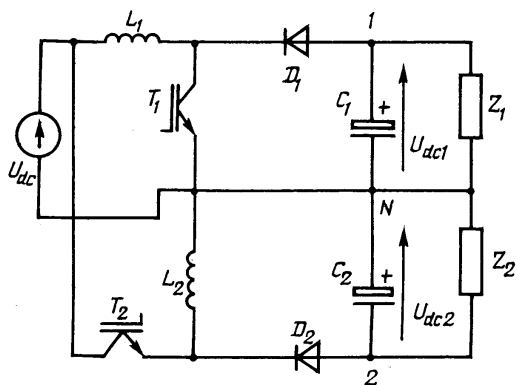


Рис. 1

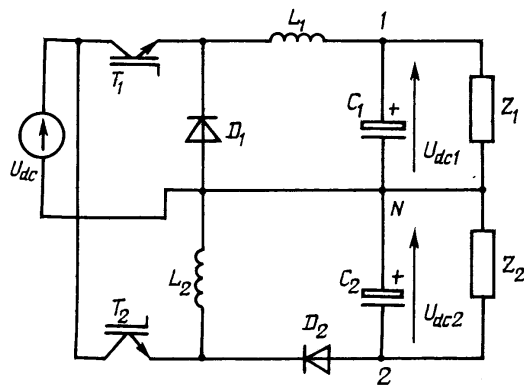


Рис. 2

Рассмотрим регулировочные характеристики ШИП типа $b+bb$. Регулирование и (или) стабилизация выходных напряжений преобразователей обоих исходных ШИП осуществляется путём циклического включения и выключения силовых транзисторов $T_1(T_2)$, применяя алгоритм управления преобразователем, который заключается в изменении длительности управляющих импульсов силовым ключом $T_1(T_2)$ с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Сумма обоих интервалов времени включенного и выключенного состояния силовых ключей $t_1 + t_2 = T_i$ определяет период несущей частоту модуляции ($f_{imp} = 1 / T_i$), тогда как отношение $t_1/T_i = \gamma$ является коэффициентом глубины модуляции выходного напряжения, который находится в диапазоне $0 \leq \gamma \leq 1$.

Пренебрегая переменной составляющей в кривой выходного напряжения и принимая допущения о идеальности элементов, коэффициенты передачи по напряжению соответственно K_{U11} 1-го исходного ШИП и K_{U12} 2-го исходного ШИП в схеме преобразователя (рис. 1) имеют вид

$$K_{U11} = \frac{1}{1-\gamma}; \quad K_{U12} = -\frac{\gamma}{1-\gamma}. \quad (1)$$

Согласно выражениям (1) первый ШИП *boost* формирует напряжение на выходных зажимах такой же полярности, как напряжение источника питания U_{dc} , и средняя величина этого напряжения может быть только большей напряжения U_{dc} . Выходное напряжение U_{dc2} второго ШИП *bb* имеет противоположную полярность выходного напряжения по сравнению с напряжением источника питания U_{dc} , а средняя величина этого напряжения может быть как меньшей, так и большей напряжения питания U_{dc} .

Трехуровневый ШИП buck+bb. Целесообразно использовать вместо исходного ШИП *boost* в трехуровневом ШИП конвенциональный ШИП *buck* [2], который формирует напряжение на выходных зажимах такой же полярности, как напряжение источника питания U_{dc} , а средняя величина выходного напряжения может регулироваться в сторону величин, меньших от напряжения U_{dc} . На рис. 2 представлена схема трехуровневого преобразователя, состоящего из двух ШИП, в котором первый выполнен по схеме преобразователя *buck*, а второй – по схеме ШИП *buck-boost* (сокращенно – преобразователь *buck+bb*). Каждый из исходных ШИП состоит соответственно из четырех элементов L_1, T_1, D_1, C_1 и L_2, T_2, D_2, C_2 .

Так как принцип работы 1-го исходного ШИП *buck* достаточно полно описан в работе [2], рассмотрим регулировочные характеристики ШИП *buck+bb* (рис. 2). Регулирование и (или) стабилизацию выходных напряжений преобразователей обоих исходных ШИП в преобразователях $b+bb$ и *buck+bb* осуществим путём циклического включения и выключения силовых транзисторов $T_1(T_2)$, применяя описанный выше алгоритм управления преобразователем, который заключается в изменении длительности управляющих импульсов управления силовыми ключами $T_1(T_2)$ с помощью ШИМ.

Соответственно коэффициенты передачи по напряжению K_{U21} и K_{U22} 1- и 2-го исходных ШИП в схеме преобразователя, показанной на рис. 2, имеют следующий вид:

$$K_{U21} = \gamma; \quad K_{U22} = -\frac{\gamma}{1-\gamma}. \quad (2)$$

Согласно выражениям (2) первый ШИП *boost* обладает иными функциональными свойствами, чем ШИП, рассмотренный на рис. 1, так как средняя величина его выходного напряжения может быть только меньше напряжения U_{dc} . Вместе с тем он формирует выходное напряжение на выходных зажимах такой же полярности, как напряжение источника питания. Вторым ШИП типа *bb* имеет противоположную полярность выходного напряжения U_{dc2} по сравнению с напряжением источника питания U_{dc} и подобные свойства, как второй исходный ШИП рис. 1, и аналогичный коэффициент передачи по напряжению $K_{U22} = K_{U12}$.

Трехуровневый ШИП типа buck+Чука. Можно также построить трехуровневый ШИП с подобными свойствами, как трехуровневый ШИП (рис. 2), используя в качестве исходных ШИП сочетание преобразователей *buck* и *Чука* [1] (по имени автора, предложившего схему преобразователя).

Схема силовой части трехуровневого преобразователя *buck+Чука* представлена на рис. 3 и состоит из двух исходных ШИП, где первый выполнен по схеме преобразователя *buck*, а второй – по схеме ШИП типа *Чука*. Преобразователь *buck* построен на четырех элементах и описан выше, тогда как преобразователь *Чука* построен с использованием двух полупроводниковых (транзистора T_2 и диода D_2) и четырех реактивных элементов. Конденсатор C_{21} применяется в качестве промежуточного звена для циклического обмена электрической энергией между источником энергии и выходным накопительным конденсатором C_{22} . Введение дросселя L_{21} связано с необходимостью придания входной цепи свойств источника тока, тогда как дроссель L_{22} совместно с конденсатором C_{22} создают выходной сглаживающий фильтр.

Преимуществом этого ШИП является использование конденсатора, а не линейного дросселя в качестве элемента, осуществляющего циклическое с несущей частотой модуляции накопление и передачу энергии от источника к выходному накопительному элементу.

Преобразователь *Чука* является более сложным для проектирования и настройки, так как содержит четыре реактивных элемента. Исходя из функциональных назначений каждого из реактивных элементов, в работе [1] определен коэффициент передачи по напряжению K_{U32} второго исходного ШИП (рис. 3).

Соответственно коэффициенты передачи по напряжению K_{U31} и K_{U32} первого и второго исходных ШИП в схеме преобразователя на рис. 3 имеют вид

$$K_{U31} = \gamma; \quad K_{U32} = -\frac{\gamma}{(1-\gamma)} \frac{Z_{C1}}{Z_{L1}}. \quad (3)$$

Из этого следует, что коэффициент передачи по напряжению K_{U32} преобразователя DC/DC *Чука* отличается от выражения K_{U22} для преобразователя DC/DC *bb* дополнительным множителем Z_{C1}/Z_{L1} , который можно выбирать как равным, так и большим единицы. Выражение (3) является приближенным для оценки K_{U32} , так как элементы множителя Z_{C1}/Z_{L1} зависят от частоты и добротности реактивных элементов преобразователя.

Выходное напряжение U_{dc2} второго исходного ШИП типа *Чука* имеет противоположную полярность напряжения по сравнению с напряжением источника питания U_{dc} , а средняя величина этого напряжения может быть как меньше, так и больше напряжения U_{dc} . Именно указанное свойство преобразователя *Чука* позволило построить трехуровневый преобразователь, показанный на рис. 3.

По сравнению с преобразователем *buck+bb* (рис. 2) преобразователь *buck+Чука* (рис. 3) имеет повышенное число элементов силовой цепи преобразователя и, как следствие, требует более трудоемкого проектирования и настройки. Данное обстоятельство является важным недостатком преобразователя *buck+Чука*.

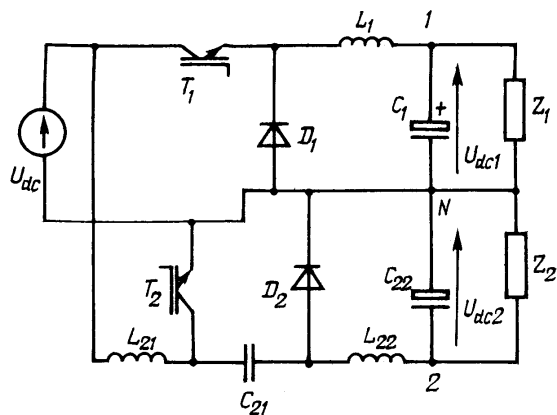


Рис. 3

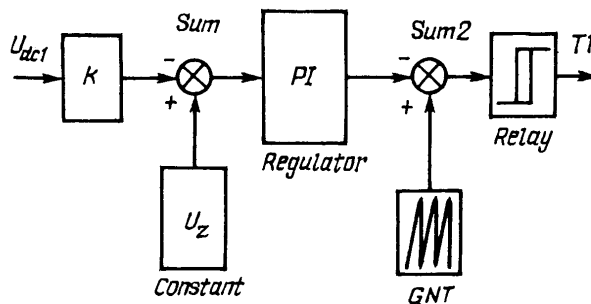


Рис. 4

Устройства управления. Трехуровневый ШИП должен иметь два независимых один от другого устройства управления (УУ) с исходными ШИП. Важным достоинством рассматриваемого УУ являются его универсальность и возможность применения для каждого из исходных ШИП рассмотренных трехуровневых ШИП (типа *boost*, *buck-boost*, Чука и *buck*). Аналогичные по назначению и построению, каждый из них контролирует и стабилизирует соответственно напряжения U_{dc1} и U_{dc2} преобразователя.

Блок-схема устройства управления показана на рис. 4, в которой реализован алгоритм управления с замкнутой петлей отрицательного обратного напряжения. Блок *Constant* формирует напряжение задания U_z , которое со знаком «плюс» поступает на блок *Sum*. Выходное напряжение U_{dc1} (или U_{dc2}) с выхода ШИП поступает на усилитель и по умножению на коэффициент усиления k (с целью согласования с величиной напряжения задания) поступает на отрицательный вход блока *Sum*. Результирующий выходной сигнал блока *Sum* поступает на регулятор *PI*, и после усиления и коррекции сигнала ошибки (согласно усилению и постоянным времени регулятора) суммируется на втором блоке *Sum2* с высокочастотным треугольным (либо пилообразным) сигналом модуляционной частоты блока *GNT* (около 20 кГц).

Выходной сигнал блока *Sum2* преобразуется компаратором *Relay* в последовательность модулированных по частоте и длительности импульсов управления, следующих на вход силового транзистора T_1 (T_2).

Компьютерная реализация в программе *Simulink-MathLab* устройства управления показана на рис. 5. Из приведенной схемы модели видно, что она построена по описанной блок-схеме устройства управления (рис. 4).

На входные зажимы *In1*, *In2* поступают соответственно напряжение задания U_z и выходное напряжение исходного ШИП в виде отрицательного обратного напряжения.

Параметры генераторов треугольного сигнала несущей частоты *GNT1* (*GNT2*) выбираются в окнах задания частоты [0.0 0.00005 0.00005 0.0001] и окне задания амплитуды [-5 5 5 -5]. В результате частота треугольного сигнала и амплитуда равны 10 кГц, 5 В. Эта частота фактически является несущей частотой модуляции $f_{imp} = 10$ кГц выходного напряжения ШИП.

Последовательности модулированных по частоте и длительности импульсов управления с выхода компаратора

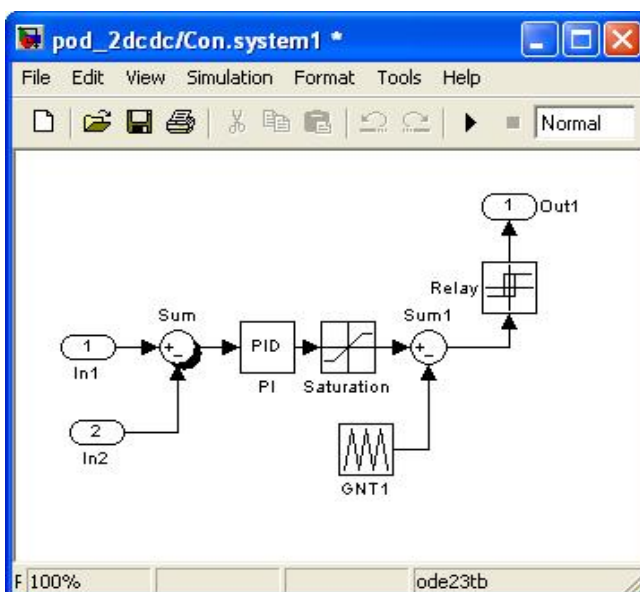


Рис. 5

Relay следуют через выходные зажимы *Out1* на вход силовых транзисторов $T_1(T_2)$.

Заключение. В работе рассмотрены основные свойства трех структур построения трехуровневых ШИП на основе комбинированного использования исходных преобразователей различного типа (*boost*, *buck–boost*, *Чука* и *buck*). Они создают дополнительные возможности в построении трехуровневых источников питания, на выходных зажимах которых можно получить два выходных регулируемых и стабилизированных напряжения постоянного тока как в сторону больших величин от напряжения питания, так и в сторону меньших величин напряжения питания преобразователя.

Из-за повышенных требований к таким источникам питания постоянного тока, к которым относится возможность регулирования и стабилизации каждого из выходных секционированных напряжений в отдельности, а также незначительного содержания в выходных напряжениях переменных составляющих, рассмотренные устройства можно классифицировать как активные делители напряжения.

Изложенное подтверждает целесообразность построения трехуровневых источников постоянного тока с комбинированным использованием в их составе конвенционального ШИП типа *buck*, который отличается простотой построения, управления и настройки.

Рассмотрены возможные построения трехуровневых ШИП с использованием в качестве одного из исходных двухуровневых преобразователей ШИП типа buck и анализ их основных свойств и регулировочных характеристик.

The possible structures of three-level pulse width converters with their application as one of the initial two-level pulse width converters buck and the analysis of their basic properties and regulating characteristics are considered in the article.

1. *Гречко Э.Н.* Трехуровневый ШИП с преобразователем Чука // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 2. – С. 101–106.
2. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 664 с.
3. *Greczko Edward, Bubacz Piotr.* Trójpoziomowe przekształtniki DC/DC // Pomiary, Automatyka, Kontrola. – 2007. – №5. – S. 60–62.

Надійшла 25.12.2009