

Полученные геометрические размеры устройства можно использовать при построении 2,5D- и 3D-электродинамических моделей в таких программах, как AWR AXIEM и Ansoft HFSS.

Таким же образом проводится моделирование других функциональных устройств СВЧ с Т- и квази-Т-волнами. Возможности моделирования волноводных устройств, в частности фильтров, ограничены отсутствием диафрагм различного типа.

Таким образом, на примере моделирования направленного ответвителя показаны основные возможности программного пакета Qucs при использовании его для синтеза и анализа микроволновых устройств в рамках учебного процесса.

Список литературы

1. AWR Design Environment NI. – URL: www.awr.com (дата обращения: 20.09.19).
2. Keysight ADS. – URL: www.keysight.com (дата обращения: 20.09.19).
3. Quite universal circuit simulator. – URL: www.qucs.sourceforge.net (дата обращения: 20.09.19).
4. Фуско, В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / В.Фуско; перевод с англ. А.А. Вольфман, А.Д. Муравцова; под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1990. – 287 с.

Материал поступил в редколлегию 12.10.19.

DOI: 10.30987/conferencearticle_5e028213164169.80459522
УДК 621.311.6

К.В. Быков, Н.М. Лазарева, В.М. Яров
(г. Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА», Чувашский государственный
университет)

K.V. Bykov, N.M. Lazareva, V.M. Yarov (Cheboksary, LLC Research and Production
Enterprise "ECRA", Chuvash State University)

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХУРОВНЕВОГО ПОВЫШАЮЩЕГО КОНВЕРТОРА

STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A THREE-LEVEL BOOST CONVERTER

Приведено сравнение двухфазного и трехуровневого повышающих конверторов для фотоэлектрических преобразователей. Сделан вывод о преимуществах трехуровневого повышающего конвертора, по кривой разгона получена его модель в виде передаточной функции.

A comparison of two-phase and three-level boost converters for photovoltaic converters is given. The conclusion is made about the advantages of a three-level boost converter, and its model in the form of a transfer function is obtained from the acceleration curve.

Ключевые слова: двухфазный конвертор, трехуровневый конвертор, кривая разгона, передаточная функция, моделирование в Simulink.

Keywords: two-phase converter, three-level converter, acceleration curve, transfer function, simulation in Simulink.

Изменение освещенности фотопреобразовательных панелей приводит к нестабильности генерируемого напряжения, поэтому его необходимо стабилизировать с помощью повышающих конверторов, схемные реализации которых могут быть весьма разнообразными.

Одним из часто используемых вариантов является двухфазный повышающий конвертор (рис. 1), режимы работы которого подробно исследованы в [1, 2]. Такое построение источника снижает токовую нагрузку транзисторов, а увеличение частоты пульсаций напряжения нагрузки позволяет уменьшить сглаживающий фильтр.

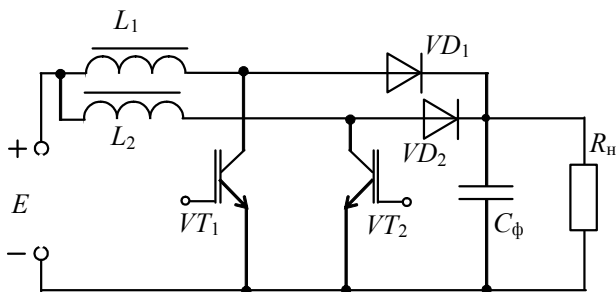


Рис. 1. Двухфазный повышающий конвертор

В качестве альтернативы можно использовать трехуровневый повышающий конвертор с ограничительными диодами (рис. 2), который рассмотрен в [3, 4].

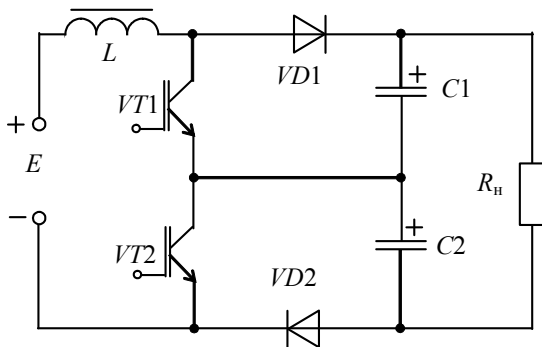


Рис. 2. Трехуровневый повышающий конвертор с ограничительными диодами

На основе [5] авторами были получены расчетные соотношения определения параметров силовой части преобразователя и выполнено имитационное моделирование процессов в трехуровневом конвертере в Simulink Matlab [6]. Временные диаграммы токов и напряжений преобразователя, полученные при моделировании, представлены на рис. 3.

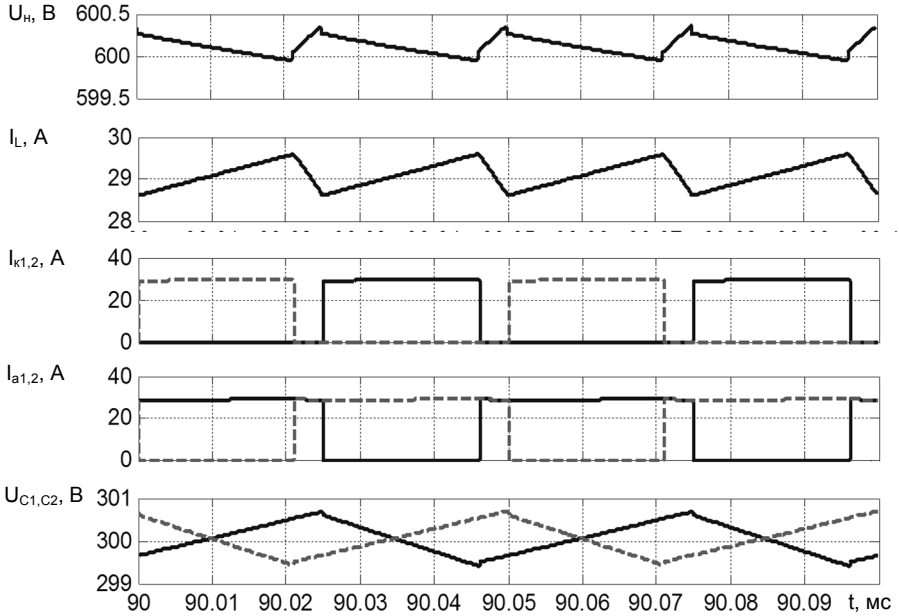


Рис. 3. Временные диаграммы токов и напряжений трехуровневого конвертора

В таблице приведены результаты моделирования режимов работы двухфазного и трехуровневого конверторов для следующих исходных данных: $E = 350 \text{ В}$, $R_n = 36 \text{ Ом}$, $U_n = 600 \text{ В}$.

Таблица 1. Результаты имитационного моделирования режимов работы конверторов в Simulink Matlab

Параметр	U_n , В	I_n , А	I_d , А	I_k , А	I_a , А	$U_{кт}$, В	γ	η , %
Двухфазный	599,6	16,65	29,69	6,76	7,61	600	0,418	0,961
Трехуровневый	600,1	16,67	29,09	12,4	16,67	300	0,84	0,98

Напряжение на транзисторах в трехуровневом конвертере равно половине напряжения на нагрузке, в то время как в двухфазном – равно напряжению нагрузки. КПД трехуровневого конвертора выше, несмотря на

то, что токи транзисторов в два раза больше, чем в двухфазном конверторе. Из зависимостей КПД от тока нагрузки (рис. 4) следует, что данный показатель у трехуровневого конвертора выше не только в номинальном режиме.

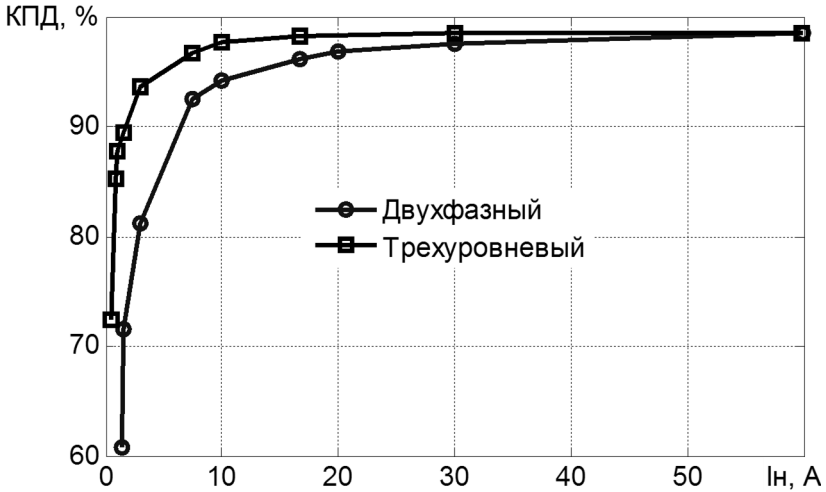


Рис. 4. Зависимости КПД конверторов от тока нагрузки

Нагрузочные характеристики $U_n = f(I_n)$ конверторов приведены на рис. 5. При малых токах напряжение нагрузки у трехуровневого конвертора более стабильное – кривая нагрузочной характеристики имеет меньший подъем.

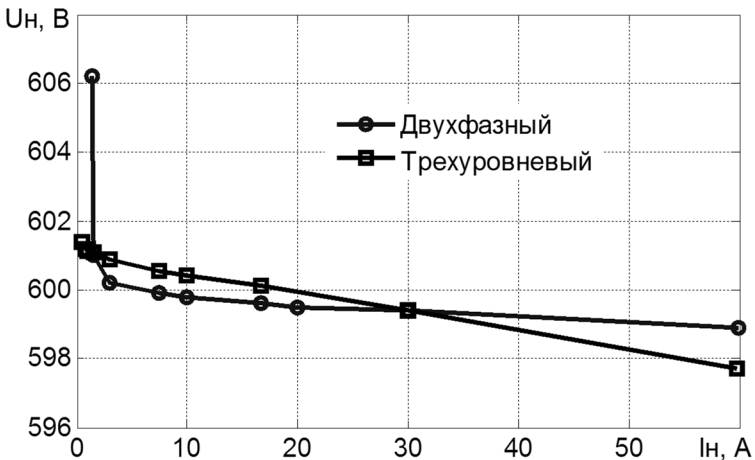


Рис. 5. Нагрузочные характеристики конверторов

Результаты позволяют сделать вывод о том, что трехуровневый конвертор более предпочтителен по сравнению с двухфазным.

Для улучшения динамических и статических характеристик преобразователя необходимо использовать замкнутую систему управления силовыми ключами. Передаточную функцию конвертора, как звена системы автоматического управления, можно определить по кривой разгона напряжения нагрузки (рис. 6).

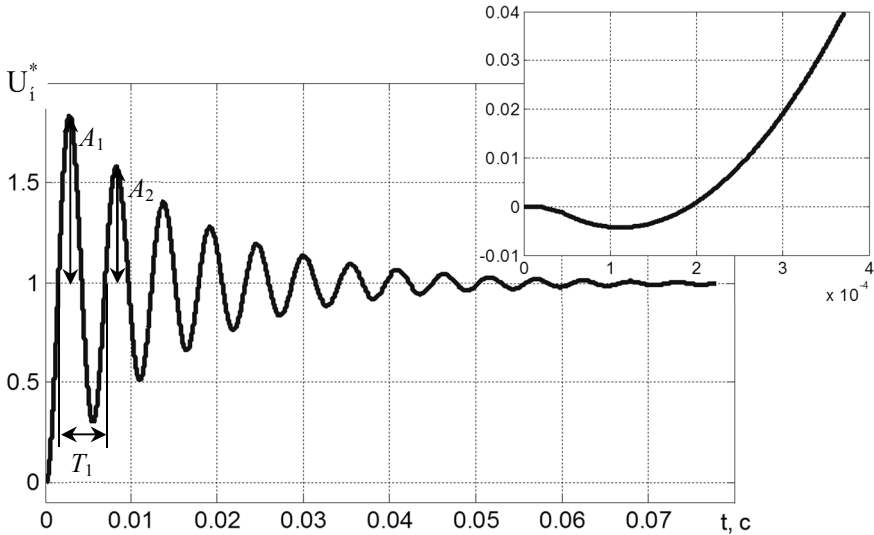


Рис. 6. Нормированная кривая разгона трехуровневого конвертора

Кривую разгона можно аппроксимировать переходной характеристикой последовательно соединенных колебательного и неминимально-фазового звеньев (рис. 7). О наличии последнего свидетельствует провал в начальной части кривой переходного процесса (см. подрисунок на рис. 6).

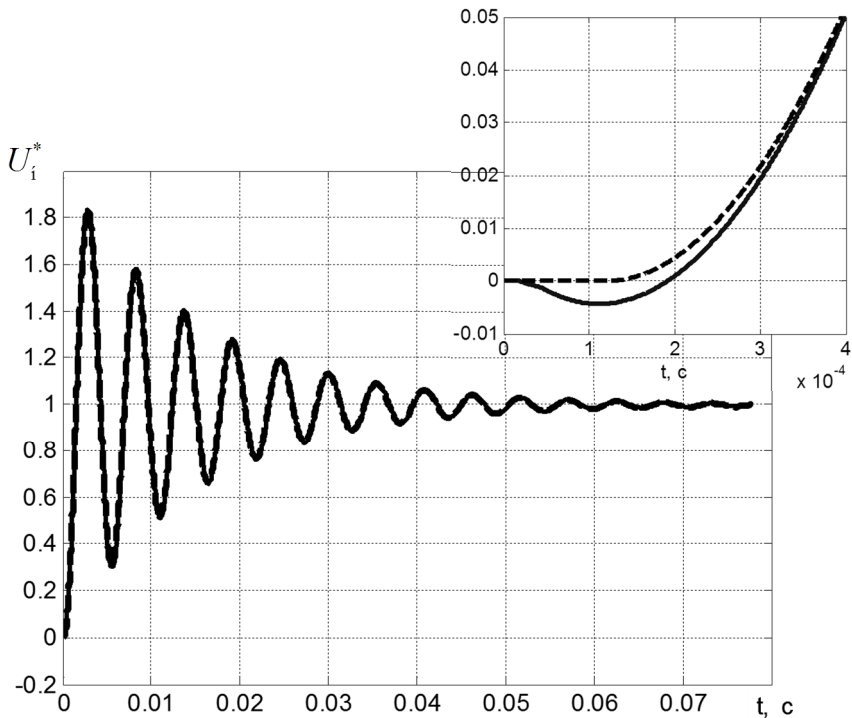


Рис. 7. Совмещенные динамические характеристики трехуровневого конвертора (сплошная линия) и звена (1) (пунктирная линия)

Постоянную времени и показатель колебательности колебательного звена по кривой разгона можно определить по следующим выражениям [2]:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} = \frac{2\pi}{5,428 \cdot 10^{-3}} = 1157,6 \text{ с}^{-1};$$

$$\beta = \frac{\ln(A_1/A_2)}{T_1} = \frac{\ln(0,85/0,59)}{5,428 \cdot 10^{-3}} = 67,27;$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{\omega_1^2 + \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1157,6^2 + 67,27^2}} = 0,863 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\xi = \beta T = 67,27 \cdot 0,863 \cdot 10^{-3} = 0,058.$$

Следовательно, передаточная функция конвертора по напряжению нагрузки при замене неминимально-фазового звена звеном с запаздыванием имеет следующий вид

$$W(p) = K_{i\dot{a}} \frac{(\tau p - 1)}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \approx \frac{K_{i\dot{a}} e^{-t_3 p}}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} = \frac{0,703 e^{-0,16 e^{-3} p}}{0,745 \cdot 10^{-6} p^2 + 0,1 p + 1}, \quad (1)$$

где τ – постоянная времени неминимально-фазового звена; t_3 – время

запаздывания; $K_{i\dot{a}} = \frac{\Delta U_i U_{\dot{o}, \dot{o}\dot{o}}}{\Delta U_{\dot{o}} U_{i, \dot{o}\dot{o}}} = \frac{600,1 - 578,1}{8,44 - 8} \frac{8,44}{600,1} = 0,703$ – коэффициент передачи разомкнутой системы управления; U_y – напряжение управления.

Графики переходной характеристики звена (1) и нормированной кривой разгона конвертора по напряжению нагрузки в масштабе, принятом на рис. 7, совпадают, что свидетельствует о достоверности модели (1). В подрисунке видно, что в начальной части кривая разгона и переходная характеристика не совпадают, чего и следовало ожидать при использованной замене звеньев в модели.

По полученной передаточной функции можно построить частотные характеристики преобразователя и определить параметры регулятора электрического режима конвертора с замкнутой системой управления [7].

Список литературы

1. Шаварин, Н.И. Двухфазный повышающий конвертор с цифровым управлением / Н.И. Шаварин, В.М. Яров, Н.М. Лазарева, А.В. Лях, А.Л. Иванов // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. тр. НПП «ЭКРА» Вып. III. – Чебоксары, 2014. – С. 64–83.
2. Шаварин, Н.И. Двухфазный повышающий конвертор как звено системы автоматического управления / Н.И. Шаварин, В.М. Яров, Н.М. Лазарева // Силовая электроника. – 2015. – № 3. – С. 40–46.
3. Мелешин, В. Трехуровневый повышающий преобразователь: непрерывные и прерывистые токи, несимметричный режим работы / В. Мелешин, С. Хухтиков, С. Сачков // Силовая электроника. – 2015. – № 3. – С. 33–39.
4. Мелешин, В.И. Трехуровневый повышающий преобразователь напряжения / В.И. Мелешин, Д.В. Жикленков, А.А. Ганьшин // Силовая электроника. – 2015. – № 2. – С. 59–66.
5. Смольников, Л.Е. Транзисторные преобразователи напряжения / Л.Е. Смольников. – М.: Изд-во МЭИ, 1983. – 224 с.
6. Лазарева, Н.М. Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.
7. Шаварин, Н.И. Динамический расчет двухфазного повышающего преобразователя / Н.И. Шаварин, В.М. Яров, Н.М. Лазарева // Силовая электроника. – 2015. – № 4. – С. 48–56.

Материал поступил в редколлегию 04.10.19.