

УДК 621.314.26

## Построение трехфазного трехуровневого инвертора напряжения на базе квази-импедансного преобразователя\*

И.А. БАХОВЦЕВ, Д.В. ПАНФИЛОВ

Рассмотрены особенности построения и работы трехфазного трехуровневого инвертора с квази-импедансным звеном, а также вопросы управления. Выведены формулы для расчета параметров квази-импедансного звена. Проведено моделирование предложенной схемы при двух различных частотах коммутации и снята внешняя характеристика. Был выполнен компьютерный эксперимент для оценки возможности регулирования коэффициента повышения напряжения звена постоянного тока. Выявлены некоторые проблемы, возникающие при работе преобразователя и намечены пути их решения.

**Ключевые слова:** трехуровневый инвертор, квази-импедансный преобразователь, коэффициент повышения напряжения, ШИМ, способ управления, расчет параметров, моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Для повышения уровня напряжения в звене постоянного тока инверторных энергетических систем обычно используют повышающие DC-DC-преобразователи, к выходу которых уже подключается инвертор, формирующий требуемые параметры выходного переменного напряжения [1]. Альтернативой DC-DC-преобразователям, имеющим целый ряд недостатков, являются накопительные (бустерные) LC-звенья различной конфигурации, работа которых совмещается с работой выходного инвертора напряжения. К таким преобразователям, в частности, относятся так называемые квази-импедансные (КИ) преобразователи [2–5]. Обладая такими преимуществами, как непрерывный входной ток, небольшая нагрузка на элементы схемы, большая надежность по сравнению с традиционными инверторами напряжения, КИ-преобразователи могут обеспечивать также и большой коэффициент повышения по напряжению [2].

Одним из способов повышения качества выходной энергетики инверторных преобразовательных систем является схемотехнический подход – использование многоуровневых схем выходного инвертора [1]. Данная статья посвящена построению и анализу работы трехуровневого трехфазного инвертора напряжения с КИ-цепями в звене постоянного тока.

### 1. ТОПОЛОГИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Топология предлагаемого трехфазного трехуровневого квази-импедансного инвертора напряжения имеет конфигурацию, представленную на рис. 1. Видно, что для питания трехуровневого инвертора требуются два одинаковых КИ-звена, работающих параллельно [5].

Как было описано в [2–4], КИ-преобразователь повышает входное напряжение инвертора за счет накопления энергии в промежутке короткого замыкания в стойках преобразователя. Коэффициент повышения КИ-звена определяется относительной длительностью состояния

---

\* Статья получена 25 апреля 2013 г.

короткого замыкания инвертора (включаются все транзисторы), в течение которого происходит накопление энергии в индуктивности [4]:

$$B = \frac{1}{1 - 2D_s}, \quad (1)$$

где  $D_s$  – это отношение длительности состояния короткого замыкания к периоду опорного сигнала ( $T_s = 1/f_s$ ) широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Как видно из (1), фактически величина  $D_s$  лежит в промежутке  $0 \leq D_s < 0,5$ . При  $D_s = 0$ , коэффициент усиления равен 1, а при  $D_s = 0,5$  стремится к бесконечности.

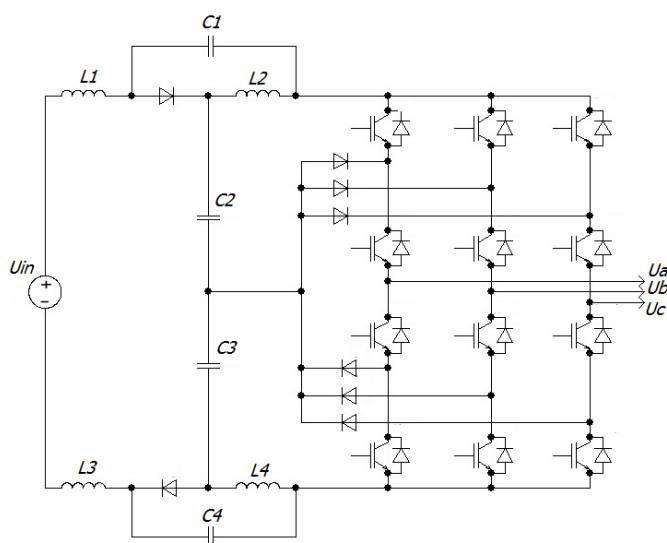


Рис. 1. Трехфазный трехуровневый КИ-АИН

В качестве алгоритма управления трехуровневым преобразователем была взята скалярная синусоидальная ШИМ с треугольным опорным сигналом. Сигналы, определяющие длительность состояния короткого замыкания, формируются системой управления (СУ) за счет сравнения того же опорного сигнала с дополнительным постоянным задающим сигналом, величина которого и определяет время короткого замыкания. Уровень задающего сигнала определяется соотношением

$$V_{ds} = V_{car}(1 - D_s),$$

где  $V_{car}$  – амплитуда опорного сигнала.

Особенностью СУ трехуровневым инвертором напряжения является использование двух опорных сигналов разной полярности, смещенных относительно друг друга на 180 электрических градусов. Смещение опорных сигналов по фазе обеспечивает симметричную форму выходного линейного напряжения. Временные диаграммы работы СУ на периоде модулирующего сигнала, приведены на рис. 2.

## 2. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КИ-ЗВЕНА

При выводе соотношений были приняты следующие допущения: потери в схеме не учитываются, процессы нарастания и спада напряжений в емкостях и токов в индуктивностях в элементах КИ-звена носят линейный характер.

Существует два основных чередующихся этапа работы анализируемой схемы. Это этап короткого замыкания, когда энергия накапливается в индуктивностях КИ-цепи, и рабочий

этап, когда запасенная энергия в сумме с энергией источника питания отдается в нагрузку. Схемы замещения этих этапов изображены на рис. 3.

При выводе воспользуемся методикой, описанной в [3, 5].

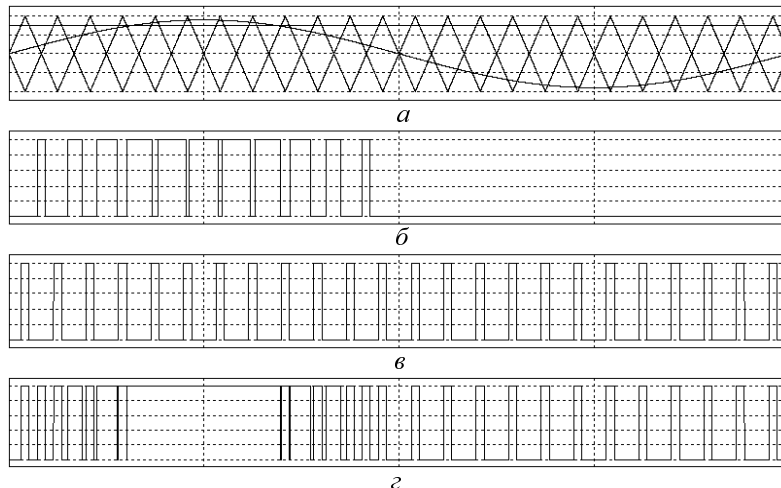


Рис. 2. Временные диаграммы системы управления:

*a* – опорные сигналы, модулирующий и задающий сигналы; *б* – импульсы ШИМ; *в* – импульсы состояния короткого замыкания; *г* – импульсы управления ключом инвертора

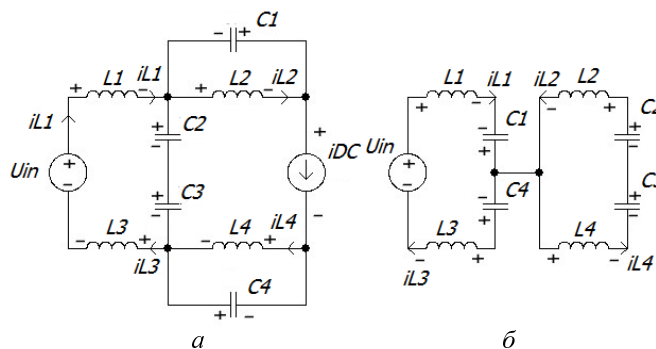


Рис. 3. Схемы замещения:

*a* – на рабочем этапе; *б* – на этапе короткого замыкания

Формы тока в индуктивностях и напряжения на емкостях за период опорного сигнала имеют пульсирующий характер [3, 5]. Чтобы определить величины индуктивностей и емкостей, необходимо задаться коэффициентами пульсаций на них.

$$K_{\tilde{N}} = \frac{\Delta U_C}{U_C}; \quad K_L = \frac{\Delta I_L}{I_L}, \quad (2)$$

где  $\Delta U_C$ ,  $\Delta I_L$  – амплитудные значения пульсаций напряжения на емкости и тока в индуктивности соответственно;  $U_C$ ,  $I_L$  – соответствующие средние значения.

Полагая, что значения уровней напряжения на входных конденсаторах инвертора равны, выразим значения напряжений на индуктивностях на промежутке рабочего этапа из схемы замещения (рис. 3, *a*):

$$u_{L1} = \frac{U_{IN}}{2} - U_{C2}, \quad (3)$$

$$u_{L2} = -U_{C1}, \tag{4}$$

где  $U_{IN}$  – напряжение источника питания. Выразим эти значения на промежутке короткого замыкания из схемы замещения (рис. 3, б):

$$u_{L1} = \frac{U_{IN}}{2} + U_{C1}, \tag{5}$$

$$u_{L2} = U_{C2}. \tag{6}$$

Используя полученные выражения и учитывая закон сохранения мощности, получим формулы для расчета индуктивностей и емкостей КИ-звеньев в общем виде:

$$L1 = L2 = L3 = L4 = \frac{U_{IN}^2}{2 \cdot P_{OUT} \cdot K_{L1} \cdot fs} \cdot Ds, \tag{7}$$

$$\tilde{N}1 = \tilde{N}4 = \frac{2 \cdot P_{OUT}}{2\pi U_{IN}^2 \cdot K_{\tilde{N}1} \cdot fs} \cdot \frac{(1 - 2Ds)^2 \cdot \cos(4\pi \cdot Ds)}{Ds}, \tag{8}$$

$$\tilde{N}2 = \tilde{N}3 = \frac{2 \cdot P_{OUT}}{2\pi U_{IN}^2 \cdot K_{\tilde{N}2} \cdot fs} \cdot \frac{(1 - 2Ds)^2 \cdot \cos(4\pi \cdot Ds)}{1 - Ds}, \tag{9}$$

где  $P_{OUT}$  – выходная мощность (мощность нагрузки).

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование предложенной схемы преобразователя проводилось в программной среде *PowerSim*. Модель силовой схемы соответствует топологии, изображенной на рис. 1. Модель системы управления представлена на рис. 4. В силовой схеме не учитываются потери, ключи идеальные, источник напряжения идеальный, нагрузка имеет активно-индуктивный характер. Подсистема *S1* преобразует заданный коэффициент повышения в соответствующий сигнал задания.

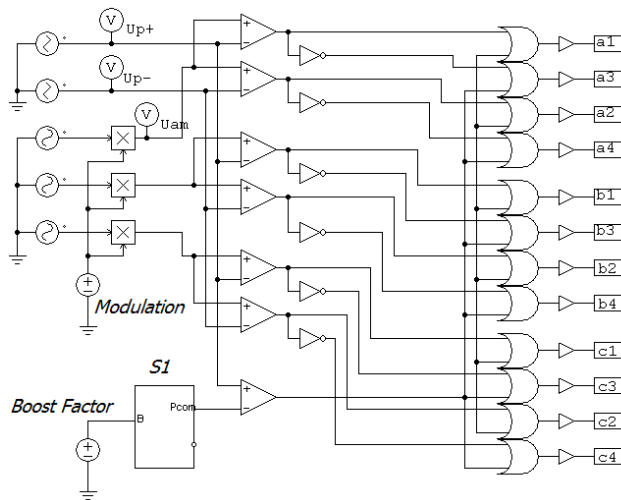


Рис. 4. Модель системы управления

По формулам (7) – (9) двух частот коммутации были рассчитаны значения пассивных элементов схемы. Для расчета были выбраны коэффициенты пульсаций  $K_{C1,C4} = K_{L2,L4} = 10\%$  и  $K_{C2,C3} = K_{L1,L3} = 1\%$  [5].

Для рассчитанных параметров КИ-звена были получены временные диаграммы выходного линейного напряжения, тока в нагрузке, напряжения звена постоянного тока и тока потребляемого от источника (рис. 5).

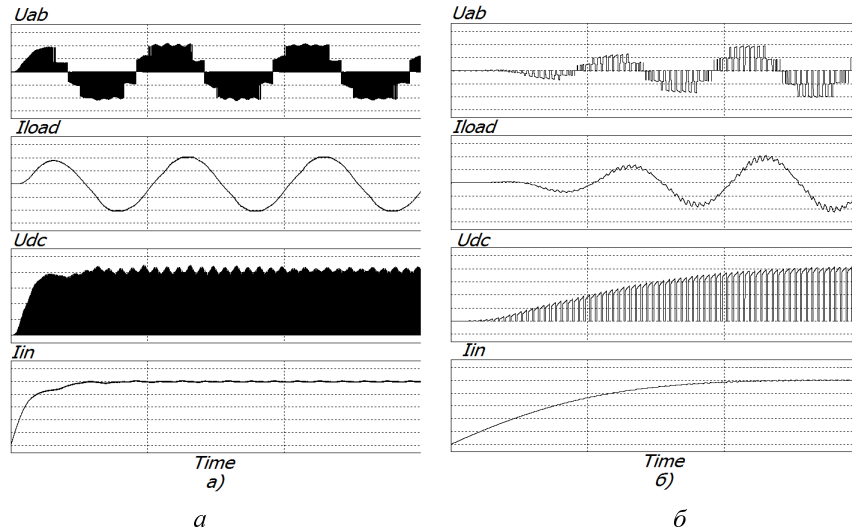


Рис. 5. Эпюры выходного линейного напряжения (100 В/дел), тока нагрузки (20 А/дел), напряжения питания инвертора (50 В/дел) и входного тока (10 А/дел) при частоте коммутации:

*a* – 9 кГц; *б* – 1.2 кГц. Масштаб по оси времени 0,02 с/дел.

Из полученных диаграмм видно, что величина линейного напряжения соответствует ожидаемой: амплитуда в два раза больше напряжения источника преобразователя  $U_{IN} = 100$  В. В напряжении звена постоянного тока появляются гармоники, кратные трем, обусловленные работой силовой схемы, а также характером и величиной нагрузки. Ток источника питания для обеих частот имеет непрерывный характер.

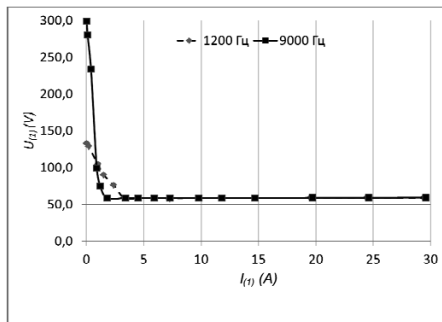


Рис. 6. Внешние характеристики инвертора для двух частот коммутации

Также в процессе моделирования для двух частот коммутации (и соответствующих параметров КИ-звеньев) были сняты внешние характеристики инвертора (рис. 6). Из графиков видно, что во внешней характеристике имеется интервал «жесткой» зависимости, соответствующий характеристике традиционного АИН, и интервал «мягкой» зависимости в области малых нагрузок. С изменением частоты коммутации меняется положение точки перегиба, крутизна характеристики на начальном интервале и величина перенапряжения.

Ярко выраженный наклон внешней характеристики при малых нагрузках (примерно менее 10 % от номинального значения) обусловлен про-

цессом накопления энергии в КИ-звеньях, которая не успевает сбрасываться в нагрузку.

Проблему нарастания напряжения в звене постоянного тока можно решить включением балластной нагрузки в звено постоянного тока инвертора, однако более рационально – регулировать величину  $D_s$ .

Все вышесказанное позволяет с достаточной степенью уверенности констатировать, что предложенная топология трехфазного трехуровневого квази-импедан-сного АИН является перспективной, в частности применительно к автономным системам энергоснабжения малых и средних мощностей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема трехфазного трехуровневого инвертора напряжения с КИ-звеном и соответствующий способ управления.

Получены в общем виде соотношения для расчета элементов КИ-звена.

Разработана модель преобразователя и рассмотрены режимы его работы, получены временные диаграммы и снята внешняя характеристика.

Выявлены некоторые проблемы, связанные с построением и работой КИ-преобразователя и намечены пути их решения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Зиновьев Г.С.** Основы силовой электроники: учеб. пособие / Г.С. Зиновьев. – 4-е изд, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009 – 672 с.
- [2] **Nagaraj M.** Simulation Study of Quasi Impedance Source Isolated DC/DC Converter Fed Drives / M. Nagaraj, Dr.M. Sasikumar // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2012. – Vol. 2. – Issue 2. – Pp. 167–171.
- [3] **Vinnikov D.** Step-Up DC/DC Converters with Cascaded Quasi-Z-Source Network / D. Vinnikov, I. Roasto, R. Strzelecki etc. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59. – № 10.
- [4] **Nguyen M.-K.** Switched-Inductor Quasi-Z-Source Inverter / M.-K. Nguyen, Y.-C. Lim, G.-B. Cho // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2011. – Vol. 26. – № 11.
- [5] **Гусев А.А.** Трехуровневый квази-импедансный инвертор с новым методом модуляции / А.А. Гусев, С.А. Степенко, К.Р. Клементе и др. // Техническая электродинамика. Тематич. выпуск СЭЭ. – Ч. 1. – Харьков, 2012, – С. 47–52.

### REFERENCES

- [1] Zinov'ev G.S. Osnovy silovoj jelektroniki. Ucheb. posobie / Zinov'ev G.S. – 4-e izd., ispr. i dop. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2009. – 672 s.
- [2] Nagaraj M., Sasikumar Dr.M. Simulation Study of Quasi Impedance Source Isolated DC/DC Converter Fed Drives. International Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 2, Issue 2, Mar-Apr 2012, pp.167–171.
- [3] Vinnikov D., Roasto I., Strzelecki R. etc. Step-Up DC/DC Converters with Cascaded Quasi-Z-Source Network // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, № 10. – October, 2012.
- [4] Nguyen M.-K., Lim Y.-C., Cho G.-B. Switched-Inductor Quasi-Z-Source Inverter. / IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, № 11. – November, 2011.
- [5] Gusev A.A., Stepenko S.A., Klemente K.R. i dr. Trehurovnevyy kvazi-impedansnyj invertor s novym metodom moduljacji // Tehnicheskaja jelektrodinamika. Tematich. vypusk SJEJe. - Har'kov, 2012, Ch. 1. – S. 47–52.

*Баховцев Игорь Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, член *IEEE*. Основное научное направление исследований – анализ, синтез, микропроцессорная реализация способов управления автономными инверторами с ШИМ. Имеет 73 публикации, в том числе два учебных пособия. E-mail: igor\_55@ngs.ru

*Панфилов Дмитрий Валерьевич*, аспирант кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основное научное направление исследований – анализ, синтез топологий и способов управления двух- и многоуровневых квази-импедансных преобразователей. Имеет 3 публикации, в том числе одно учебное пособие. E-mail: dmitry89@ngs.ru

**I.A. Bakhovtsev, D.V. Panfilov**

*Three-phase three-level inverter of voltage based on a quasi-z-source network*

The article describes the particulars of building and operation of three-phase three-level voltage source inverter with quasi-z-source (qZS) network. The topology and control system was proposed. The formulae evaluating parameters of qZS-cell was derived. The model of proposed power circuit was built and analyzed. In first chapter the quasi-z-source network term is described and the advantages of the qZS-converter compared to pulse boost converter are introduced. The second chapter deals with the proposed topology of three-phase three-level qZSI. Next chapter describes the control method of proposed topology. The necessary modifications of sinusoidal PWM are submitted. The equations for calculating qZS-network elements are derived by analyzing the equivalent circuits in fourth chapter. In the last chapter the simulation of proposed topology was carried out. The models of power circuit and control system were built in PSIM environment. Parameters of qZS-network were calculated using the equations derived in fourth chapter. The time diagrams of output voltage and current and voltage and current in DC-link was obtained. The output characteristics with two different switching frequencies were graphed. In conclusion all results were summarized.

**Key words:** three-level inverter, Quasi-z-source network, topology, PWM, calculation, control method, time diagrams, boost converter, output characteristic, equivalent circuit, simulation.