

## РЕЗОНАНСНЫЕ ИНВЕРТОРЫ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Э.Н. Гречко, докт. техн. наук

Зеленогурский университет, Институт информатики и электроники,  
Польша

*Рассмотрен резонансный инвертор последовательно-параллельного типа с улучшенными характеристиками при работе на активно-емкостную нагрузку, в частности, используя в качестве промежуточного звена Т-типа с магнитными связями индуктивностей в продольных ветвях. Библ. 3, рис. 3.*

**Ключевые слова:** резонансный инвертор, четырехполюсник, индуктивность, конденсатор.

При построении резонансных инверторов высокой частоты с формированием синусоидального выходного напряжения целесообразно использовать полностью управляемые элементы (силовые транзисторы BJT, MOSFET, IGBT либо тиристоры GTO и др.). Выходным цепям таких инверторов [1] придается резонансный характер, что позволяет получить квазисинусоидальное напряжение на нагрузке.

В качестве основной схемы построения резонансного инвертора используется [1] последовательно-параллельный резонансный инвертор (рис.1), позволяющий формировать высокочастотное синусоидальное напряжение на нагрузке (порядка нескольких десятков кГц). Питание представленного инвертора осуществляется от промышленной сети через неуправляемый выпрямитель, имеющий свойства источника напряжения. Поэтому выходная цепь инвертора (четырёхполюсник Г-типа) строится на основе последовательного резонанса. На выходных зажимах четырехполюсника эта цепь характеризуется свойствами источника тока, что необходимо для нагрузки, параметры которой имеют активно-емкостный характер [3]. Другим важным качеством промежуточного звена Г-типа является то, что активно-емкостная нагрузка трансформируется на выходные зажимы непосредственно инвертора как активно-индуктивная. Наряду с этим промежуточное звено Г-типа, представляя собой фактически фильтр низких частот, позволяет формировать квазисинусоидальное выходное напряжение на основной частоте инвертирования, ослабляя при этом высокочастотные гармонические составляющие.

Целью статьи является рассмотрение резонансного инвертора последовательно-параллельного типа с улучшенными выходными характеристиками при работе на емкостную нагрузку, в частности, используя в качестве промежуточного звена Г-типа звено Т-типа с магнитными связями индуктивностей в продольных ветвях фильтра. Предпосылкой к проведению исследований послужили экспериментальные исследования последовательного резонансного инвертора, применяемого в активаторе полиэтиленовой фольги [3].

**Резонансный инвертор с промежуточным звеном в виде четырехполюсника Г-типа.** В схеме последовательно-параллельного резонансного инвертора [1, 3], показанной на

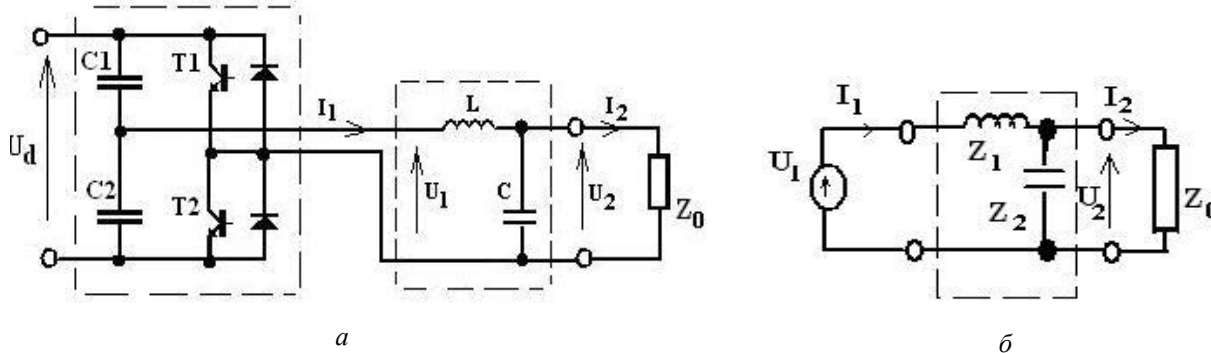


Рис. 1

рис. 1, промежуточное звено (рассматриваемое далее как четырехполюсник) между полумостовым инвертором, построенном на транзисторах T1, T2, и нагрузкой  $Z_0$  содержит дроссель и конденсатор, которые подключены последовательно к выходным зажимам инвертора с последующим параллельным подсоединением нагрузки к зажимам конденсатора. Параметры дросселя и конденсатора в последовательно-параллельном резонансном инверторе выбираются исходя из резонанса на частоте работы мостового инвертора напряжения.

На этапе предварительного проектирования целесообразно пользоваться схемой замещения инвертора на основной частоте его работы, которая приведена на рис. 1 б. Инвертор в этом случае представлен в виде идеального источника синусоидального напряжения, а дроссель и конденсатор приняты для упрощения идеальными ( $R_L=0, R_C=0$ ). Промежуточное звено последовательно-параллельного резонансного инвертора при таком выборе элементов на основной частоте работы инвертора представляет собой известный из электротехники индуктивно-емкостный преобразователь [2]. На основной частоте инвертирования промежуточное звено Г-типа обладает свойствами параметрической стабилизации тока в нагрузке. Схема замещения последовательно-параллельного резонансного инвертора описывается известными уравнениями в А-форме:

$$(1) \quad \begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + Z_1 Y_2 & Z_1 \\ Y_2 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & j\omega L \\ j\omega C & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix}.$$

Из уравнений (1) следует, что промежуточный четырехполюсник является несимметричным. Тем не менее для него выполняется условие необратимости четырехполюсника  $\det A_T=1$ . Равенство параметра  $A_{11} = 0$  свидетельствует о том, что промежуточное звено резонансного инвертора обладает свойствами источника тока. Выходной ток инвертора  $I_2 = U_1/j\omega L$  пропорционален действующему значению основной гармоники выходного напряжения дискретной части инвертора и не зависит от нагрузки на частоте работы резонансного инвертора. Значение выходного тока инвертора в режиме короткого замыкания нагрузки ограничено индуктивностью дросселя.

**Резонансный инвертор с промежуточным звеном в виде четырехполюсника Т-типа.** Заслуживает внимания применение промежуточного звена Т-типа, так как позволяет уменьшить массу и габариты цепи благодаря дополнительным магнитным связям [2]. Схема инвертора со звеном Т-типа в выходных цепей представлена на рис. 2 а. На рис. 2 б показана схема замещения инвертора на основной частоте работы инвертора, в которой исключены магнитные связи элементов. Выбирая параметры четырехполюсника из условия равенства реактансов  $\frac{\omega L}{2} = \frac{1}{2\omega C}$ , а также задаваясь высокой добротностью элементов четырехполюсника и коэффициентом магнитной связи индуктивностей, равным единице (т.е.  $\frac{\omega L}{2} = \frac{\omega M}{2}$ ), уравнения цепи, описывающие схему замещения инвертора, имеют следующий вид:

$$(2) \quad \begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + YZ_1 & Z_1 + Z_2 + YZ_1 Z_2 \\ Y & 1 + YZ_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & j\omega L \\ j\omega C & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix}.$$

Промежуточное звено обладает одновременно свойствами симметричности и обратимости четырехполюсника. Равенство параметра  $A_{11}=0$  свидетельствует, как и в предыдущем случае, что промежуточное звено резонансного инвертора обладает свойствами источника тока. Выходной ток инвертора  $I_2 = U_1/j\omega L$  пропорционален действующему значению основной гармоники выходного напряжения дискретной части инвертора.

При нулевой нагрузке (режим короткого замыкания на выходе) ток на входе четырехполюсника равен нулю, так как четырехполюсник Т-типа преобразуется в последовательное соединение индуктивности  $L$  с параллельным резонансным контуром  $LC$ . В режиме холостого хода цепь преобразуется в последовательную резонансную цепь, вследствие чего ток на входе (а также напряжение на выходе) теоретически возрастает до бесконечности. Таким образом, для резонансного инвертора с промежуточным звеном в виде четырехполюсника Т-типа режим короткого замыкания нагрузки является нормальным режимом работы резонансного инвертора, а режим холостого хода – аварийным.

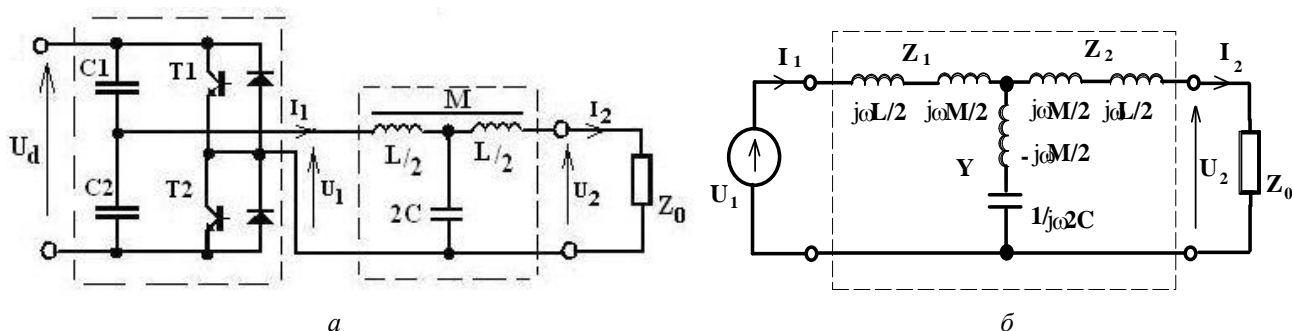


Рис. 2

**Моделирование инвертора.** На этапе компьютерного моделирования свойства последовательно-параллельного резонансного инвертора исследуются при минимальном числе допущений. Приближение к высокой степени точности анализа свойств рассмотренных систем достигается правильным выбором добротности дросселей  $Q = \omega L/R$ , а также задавая реальную форму кривой выходного напряжения дискретной части инвертора.

Представим результаты моделирования резонансных инверторов рассматриваемого типа с помощью пакета TCAD при добротности индуктивностей  $Q=15$ , ненулевых сопротивлениях транзисторных ключей и внутреннего сопротивления источника питания, выходной частоте работы инвертора 22,7 кГц. Параметры резонансного инвертора и нагрузки, подключенной через трансформатор высокого напряжения, выбраны как для инвертора, применяемого для активации полиэтиленовой фольги [3], а именно: постоянное напряжение питания инвертора – 600 В; емкость конденсаторов в цепи постоянного тока – 840 мФ; параметры четырехполюсника –  $L = 0,604$  мГн,  $C = 12,3$  пФ; номинальные параметры нагрузки, приведенные к первичным обмоткам трансформатора, –  $R = 560$  Ом,  $C = 11$  пФ; индуктивность рассеивания и емкость обмоток  $L = 48$  мГн,  $C = 11$  пФ.

На рис. 3 представлены временные диаграммы выходных напряжений и токов резонансного инвертора с рис. 2 а, реализованного на основе четырехполюсника Т-типа. Кривые 1, 2 соответствуют выходному напряжению и току дискретной части инвертора. Как видно, на выходных зажимах дискретной части инвертора формируются прямоугольное напряжение и выходной синусоидальный ток.

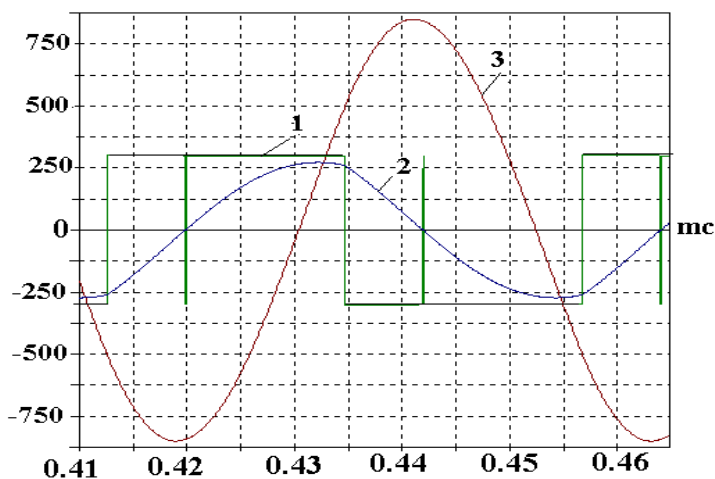


Рис. 3

и выходной синусоидальный ток. Напряжение на нагрузке (кривая 3) имеет синусоидальный характер, амплитуду, равную 875 В, и коэффициент нелинейных искажений  $THD(U_2) = 2,6$  %.

Увеличение значения напряжения нагрузки по отношению к напряжению питания инвертора является результатом умножения стабилизированного тока на величину комплексного сопротивления нагрузки. Величина параметрически стабилизированного

тока через нагрузку в обоих случаях определяется как  $I_2 = U_1 / j\omega L$ .

Для резонансного инвертора, выходные цепи которого реализованы на основе четырехполюсника Т-типа, можно отметить более высокую синусоидальность выходных напряжений ( $\text{THD}(U_2) = 2,6 \%$ ), чем в случае резонансного инвертора, показанного на рис. 1 а ( $\text{THD}(U_2) = 15,3 \%$ ). Резонансный инвертор, представленный на рис. 2 а, формирует практически синусоидальные напряжения и токи на нагрузке.

Принимая во внимание емкостный характер нагрузки, можно отметить, что пусковые величины токов дискретной части инвертора, показанного на рис. 2 а, ограничены до режима холостого хода, тогда как в случае инвертора, представленного на рис. 1 а, ограничены индуктивностью дросселя. Это указывает на существование в случае инвертора, показанного на рис. 2 а, более мягких пусковых режимов.

Результаты компьютерного моделирования обоих топологий данного типа резонансных инверторов с параметрами, приближенными к реальному инвертору (добротность дросселей  $Q=15$ , транзисторные ключи и источник питания имеют ненулевые сопротивления), подтверждают результаты и математическое описание, полученные на этапе предварительного проектирования. Это позволяет составить алгоритм предварительного инженерного проектирования резонансных инверторов рассматриваемого типа.

**Алгоритм проектирования.** Полученные результаты упрощают анализ установившихся процессов в резонансных инверторах данного типа и дают возможность составить алгоритм предварительного инженерного проектирования их промежуточных цепей:

- значение индуктивности дросселя можно определять по формуле  $I_2=U_1/j\omega L$ , принимая значение напряжения основной гармоники с учетом схемы и алгоритма управления инвертора и учитывая требуемое номинальное значение тока нагрузки;
- из условия резонанса четырехполюсников Г- или Т-типа рассчитываются емкости конденсаторов;
- значение напряжения на нагрузке для резонансных инверторов определяется как произведение величины тока  $I_2$  и комплексного сопротивления нагрузки.

В заключение можно отметить, что рассмотренный резонансный инвертор последовательно-параллельного типа, использующий в качестве промежуточного звена Т-типа с магнитными связями индуктивностей в продольных ветвях фильтра, при работе на емкостную нагрузку, является более перспективным по сравнению с конвенциональным инвертором.

1. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
2. *Липковский К.А., Пиеничный В.В., Гречко Э.Н.* К расчету выходного каскада вентиля преобразователя // Повышение эффективности устройств преобразовательной техники: Сб. науч. тр. – К.: Наук. думка, 1973. – Ч.4. – С. 256–264.
3. *Mućko J., Strzelecki R., Lutomirski S.* Falownik z tranzystorami IGBT do aktywacji folii polietylenowej // V Sympozjum „Podstawowe problemy Energoelektroniki”. – Marzec 1993. – Ustroń. – Materiały konferencyjne. – S. 418–425.

УДК 621.314.6

**Е.М. Гречко**, докт. техн. наук,

Зеленогурський університет, Інститут інформатики та електроніки,

Польща

#### **Резонансні інвертори високої частоти**

*Розглянуто інвертор послідовно-паралельного типу з поліпшеними характеристиками при роботі на активно-ємнісній навантаженні, зокрема, використовуючи проміжний ланцюг Т-типу з магнітними зв'язками індуктивностей у поздовжніх гілках.* Бібл. 3, рис. 3.

**Ключові слова:** резонансний інвертор, чотириполюсник, індуктивність, конденсатор.

**E.M. Grechko**

Zelenogurskiy University, Institute of information and electronic, Poland

**High-frequency resonance inverters**

*Resonant inverter of series-parallel type with high performance on active-capacitive load, particularly, using as intermediate T-type link with magnetic couples of inductance in lengthwise branches is considered. References 3, figures 3.*

**Key words:** resonance inverter, quadripole, inductance, capacitor.

Надійшла 25.10.2010

Received 25.10.2010