

УДК 621.314

Е.А. Копелович

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ТРАНЗИСТОРНО-КОНДЕНСАТОРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Институт прикладной физики РАН

Рассмотрены условия эффективной работы высоковольтных источников питания (ВВИП) на базе полумостового транзисторного преобразователя постоянного напряжения с дозирующими конденсаторами. Исследовано влияние индуктивности рассеивания и паразитной емкости высоковольтного трансформатора на величину выходной мощности ВВИП. Показана перспективность двухтрансформаторного варианта исполнения преобразователя. Приведены примеры практической реализации ВВИП на его основе.

*Ключевые слова:* высоковольтный источник питания, электрофизическая установка, дозирующий конденсатор, преобразователь, трансформатор.

Современные мощные электрофизические установки (ЭФУ) представляют собой крупные энергетические комплексы, выполненные на базе различных типов мощных СВЧ-приборов (гиротронов, магнетронов, ЛОВ и др.) или лазеров (газовых, твердотельных и др.). СВЧ-установки позволяют получать электромагнитное излучение частотой  $1\div 200$  ГГц мегаваттного уровня мощности как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах. Рекордные значения мощности излучения лазерных комплексов на сегодняшний день достигли уровня 1 пВт ( $10^{15}$  Вт) в моноимпульсном режиме при длительности импульса порядка 50 фс ( $50\cdot 10^{-15}$  с).

Одними из основных компонентов мощных ЭФУ, в значительной степени определяющих их технико-экономические характеристики, являются высоковольтные источники питания (ВВИП), которые обеспечивают создание ускоряющего электрического поля в мощных СВЧ-приборах или зарядку до заданного напряжения промежуточных емкостных накопителей энергии импульсных твердотельных и газовых лазеров. Требуемые значения выходного напряжения таких источников питания находятся в диапазоне  $5\div 70$  кВ при выходной мощности до сотен киловатт.

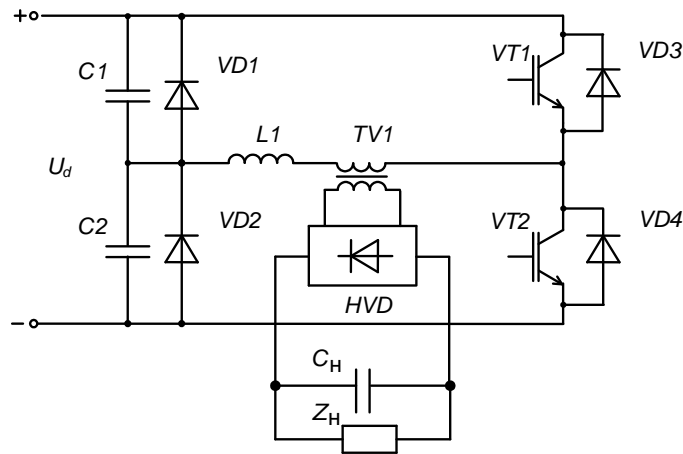
Анализ существующих технических решений ВВИП, а также опыт их разработки, накопленный за последние десять лет в отделе высоковольтной техники Института прикладной физики РАН (Н.Новгород), позволяют сделать вывод о перспективности выполнения ВВИП для мощных ЭФУ на базе полумостового транзисторного преобразователя постоянного напряжения с промежуточным емкостным дозированием передаваемой в нагрузку энергии и трансформаторным выходом (рис. 1) [1, 2].

Ключевыми достоинствами данного варианта построения ВВИП являются:

- простота схемотехнической реализации на различные уровни выходного напряжения и мощности при одновременной возможности унификации конструкции преобразовательной и высоковольтной частей источника питания;
- высокая устойчивость функционирования на нагрузки различного типа в рабочем и аварийном режимах за счет постоянства дозы энергии, передаваемой в нагрузку за такт работы ВВИП;
- малые коммутационные потери в силовых полупроводниковых приборах, благодаря колебательному характеру тока через них в широком диапазоне выходных напряжений, что позволяет обеспечить высокую ( $20\div 50$  кГц) частоту преобразования.

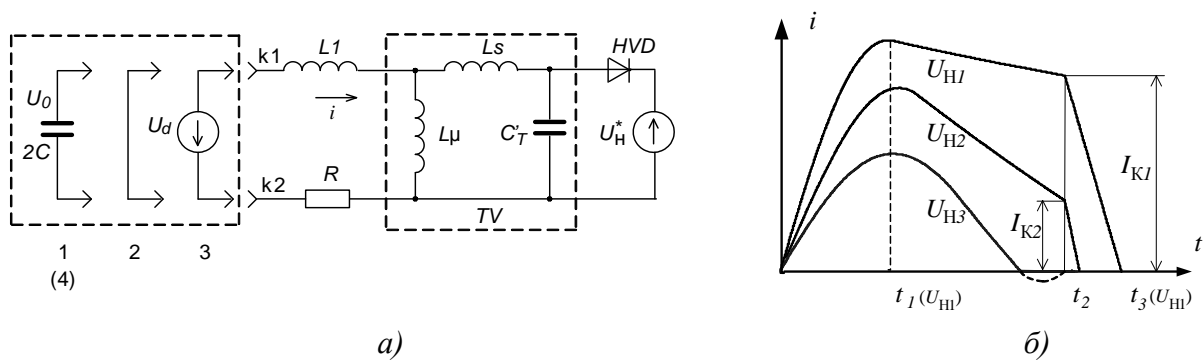
Принцип действия данного варианта транзисторно-конденсаторного преобразователя (ТРКП) заключается в поочередной передаче энергии из дозирующих конденсаторов (ДК)  $C1$ ,  $C2$  че-

рез полумостовой транзисторный модуль  $VT1, VT2$ , высоковольтный трансформатор  $TV1$  и выпрямитель  $HVD$  в нагрузку  $Z_H$ , параллельно которой подключен емкостной фильтр  $C_H$ .



**Рис. 1. Схема полумостового транзисторного преобразователя с дозирующими конденсаторами**

На полупериоде работы преобразователя  $T/2$  можно выделить три основных интервала непрерывности. Схемы замещения ТРКП на них и форма импульсов тока  $i$ , протекающих в первичной обмотке  $TV1$  при различных напряжениях на нагрузке  $U_{H1} \leq U_{H2} \leq U_{H3}$ , приведены на рис. 2, где  $C = C1 = C2$  - емкость ДК;  $U_H^* = 2U_H / kU_d$  - относительное значения выходного напряжения ВВИП (напряжения на емкостном фильтре  $C_H$ ), приведенное к первичной обмотке трансформатора;  $L = L1 + L_S$  и  $R$  - соответственно суммарная индуктивность и эквивалентное активное сопротивление контура передачи энергии ДК в нагрузку;  $k, L_S$  - соответственно коэффициент трансформации и индуктивность рассеивания  $TV1$ .



**Рис. 2. Схема замещения ТРКП на интервалах непрерывности (а) и форма импульсов тока в первичной обмотке  $TV1$  при различных значениях напряжения на нагрузке (б)**

С учетом выполняющегося на практике соотношения  $C \ll k^2 C_H$  напряжение на нагрузке в течение одного рабочего такта ТРКП принято постоянным и равным  $U_H^*$ .

Рассмотрим основные процессы в ТРКП без учета паразитных параметров высоковольтного трансформатора: индуктивности рассеивания  $L_S$  и приведенной к первичной обмотке собственной емкости его вторичных обмоток  $C_T' = k^2 C_T$ , а также считая индуктивность намагничивания трансформатора  $L_\mu$  бесконечно большой.

На первом интервале непрерывности ( $0 \leq t \leq t_1$ ) происходят разряд дозирующего конденсатора  $C1(C2)$  на противо-ЭДС  $U_H^*$  через транзистор  $VT1(VT2)$  и одновременно заряд конденсатор  $C2(C1)$  от входного источника постоянного напряжения  $U_d$  (в схеме замещения рис. 2, а на интервале 1 к точкам  $K1-K2$  подключен дозирующий конденсатор с эквивалентной емкостью  $2C$ , заряженный до напряжения  $U_0 = U_d$ ).

В момент равенства нулю напряжения ДК ( $t = t_1$  для  $U_H^* = U_{H1}^*$  рис. 2, б) включается диод  $VD1(VD2)$ , и начинается второй интервал ( $t_1 \leq t \leq t_2$ ), на котором точки  $K1-K2$  (рис. 2, а) закорочены, при этом происходит передача энергии из дросселя  $L$  в нагрузку.

На третьем интервале, который начинается в момент времени  $t_2$  по окончании импульса управления силовым транзистором длительностью  $t_y$ , энергия из дросселя  $L$  передается в нагрузку и частично возвращается во входной источник питания ТРКП через диоды  $VD1(VD2)$  и  $VD4(VD3)$ . Процессу возврата энергии соответствует подключение к точкам  $K1-K2$  (рис. 2, а) входного источника постоянного напряжения  $U_d$ .

ВВИП обеспечивает постоянство передаваемой в нагрузку мощности

$$P = P_{\max} \approx 2\eta CU_d^2 / T \quad (1)$$

и бестоковую коммутацию силовых транзисторов и диодов в диапазоне напряжений на нагрузке

$$U_{\text{гр}}^* \leq U_H^* \leq U_{H\max}^*, \quad (2)$$

где  $\eta$  – КПД преобразователя;  $U_{\text{гр}}^*$  – относительное значение граничного выходного напряжения, при превышении которого исчезает третий интервал работы ТРКП и вся энергия ДК полностью передается в нагрузку. Напряжение  $U_{\text{гр}}^*$  определяется из соотношения

$$t_y^* = \frac{t_y}{\sqrt{2LC}} = \arccos\left(\frac{U_{\text{гр}}^*}{U_{\text{гр}}^* - 2}\right) + Q \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot \sqrt{1 - U_{\text{гр}}^*}}{Q \cdot U_{\text{гр}}^*}\right), \quad (3)$$

которое нетрудно получить из условия равенства нулю тока  $i$  в момент времени  $t = t_y$ , где  $Q = \sqrt{L/2C} / R$  – добротность контура передачи энергии ДК в нагрузку.

Величина максимального выходного напряжения ВВИП  $U_{H\max}^*$ , при котором обеспечивается полная передача энергии из ДК в нагрузку, может быть найдена из условия одновременного равенства нулю напряжения на дозирующем конденсаторе  $u_C$  и тока  $i$  в момент времени  $t = t_1 = \pi\sqrt{2LC}$ :

$$U_{H\max}^* = \frac{2}{1 + \exp(\pi/2Q)}. \quad (4)$$

Дальнейшее увеличение выходного напряжения ВВИП будет происходить при неполной разрядке ДК и, следовательно, неэффективной работе источника. Используя метод разностных уравнений, можно показать, что рост выходного напряжения ВВИП закончится при  $U_{H\max}^* = 1$ , когда начальное напряжение на ДК уменьшится до значения  $U_d/2$  и ток в контуре нагрузки  $i$  станет равным нулю.

В диапазоне выходных напряжений ВВИП  $U_H^* < U_{\text{гр}}^*$  включение силовых транзисторов происходит при нулевом токе, а выключение при токе, равном

$$I_K = \frac{U_d}{\sqrt{L/2C}} \cdot \left[ (\sqrt{1-U_H^*} + \frac{QU_H^*}{2}) \cdot \exp(\frac{1}{Q} \arccos \frac{U_H^*}{U_H^*-2} - \frac{t_y^*}{Q}) - \frac{QU_H^*}{2} \right]. \quad (5)$$

В результате, при  $U_H^* < U_{гр}^*$  выходная мощность ВВИП меньше максимального значения  $P_{max}$  и равна

$$P^* = \frac{P}{P_{max}} = 1 - \frac{1}{1+0,5U_H^*} [(\sqrt{1-U_H^*} + \frac{Q \cdot U_H^*}{2}) \cdot \exp(-\frac{t_2^*}{Q}) - \frac{QU_H^*}{2}]^2, \quad (6)$$

где  $t_2^* = t_y^* - \arccos \frac{U_H^*}{U_H^*-2}$ .

Рассмотрим теперь влияние индуктивности рассеивания  $L_S$  и собственной емкости вторичных обмоток  $C_T$  высоковольтного трансформатора на значение максимальной мощности ВВИП  $P_{max}$ .

Очевидно, что длительность импульсов запуска силовых транзисторов не может быть меньше величины

$$t_y^{\min} = \pi\sqrt{2LC}, \quad (7)$$

что соответствует  $U_{гр}^* = 1$ .

Следовательно, минимально возможное значение периода работы ТРКП с учетом соотношения  $t_3 = T/2 = t_y + \sqrt{2LC}$ , определяющего длительность импульса тока  $i$  на первом рабочем такте при  $U_H^* = 0$ , равно

$$T = 2(1 + \pi)\sqrt{2LC}. \quad (8)$$

Тогда из выражений (1) и (8) следует, что при выбранной рабочей частоте преобразователя  $f = 1/T$  для получения требуемой выходной мощности ВВИП  $P_{max}$  величина индуктивности рассеивания высоковольтного трансформатора должна удовлетворять условию

$$L_S \leq \frac{\eta U_d^2}{f P_{max} (\pi + 1)^2}. \quad (9)$$

Наличие собственной емкости  $C_T'$  вторичных обмоток высоковольтного трансформатора приводит к тому, что после окончания основного импульса тока  $i$  начинается разряд  $C_T'$ , который заряжен до текущего значения выходного напряжения  $U_H^*$ , на разряженный ДК  $C1(C2)$  (интервал 4 на схеме замещения рис. 2, а). Ток разряда имеет практически синусоидальную форму и протекает через обратный диод транзисторного модуля  $VD3(VD4)$ .

Характерная для ВВИП с выходным напряжением  $U_{Hmax} \geq 25$  кВ осциллограмма тока  $i$  в первичной обмотке  $TV1$  при величинах выходного напряжения, близких к максимальному значению, приведена на рис. 3.

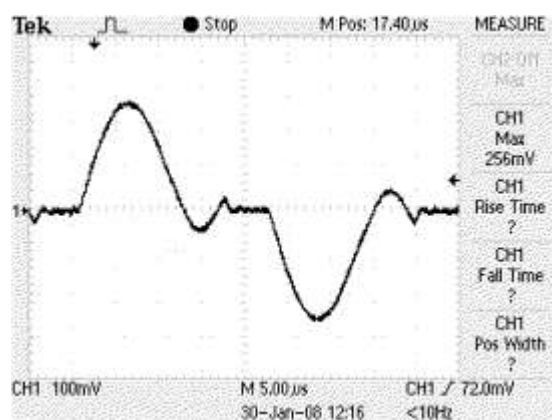


Рис. 3. Осциллограмма тока в первичной обмотке  $TV1$  ( $U_H^* \approx 1$ )

Так как обычно  $C_T' = k^2 C_2 \ll 2C$ , то ДК заряжается до напряжения

$$U_D = U_d U_H^* C_T' / C, \quad (10)$$

что приводит к уменьшению начального напряжения на другом ДК до величины

$$U_0 = U_d (1 - U_H^* C_T' / C). \quad (11)$$

В связи с этим, выходная мощность ВВИП снижается до величины

$$P_{\max} \approx 2\eta C U_d^2 (1 - U_H^* C_T' / C)^2 / T. \quad (12)$$

Таким образом, для повышения величины  $P_{\max}$  необходимо стремиться к максимальному снижению индуктивности рассеивания и собственной емкости вторичных обмоток высоковольтного трансформатора  $TV1$ . С этой целью в работах [3, 4] был предложен двухтрансформаторный вариант выполнения ТРКП (рис. 4).

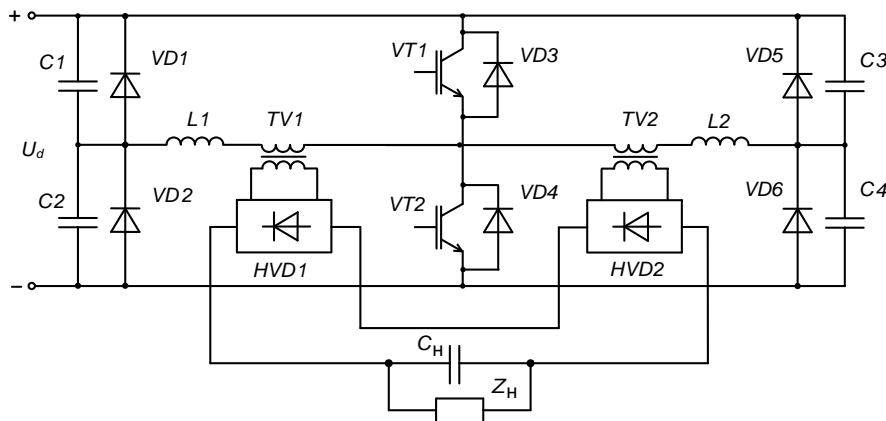


Рис. 4. Схема двухтрансформаторного ТРКП

В нем ДК  $C1 \div C4$  имеют в два раза меньшую емкость, по сравнению с вариантом схемы на рис. 1, что существенно снижает требования к величине индуктивности рассеивания высоковольтных трансформаторов  $TV1, TV2$ . Кроме того, за счет последовательного включения высоковольтных выпрямителей  $HVD1, HVD2$  в два раза снижается коэффициент трансформации каждого трансформатора, что, помимо уменьшения емкости вторичных обмоток, приводит к упрощению конструкции трансформаторов  $TV1, TV2$  и улучшает условия их охлаждения.

На базе двухтрансформаторного ТРКП в Институте прикладной физики РАН (Н.Новгород) за последние десять лет разработано и изготовлено значительное количество ВВИП для различных мощных ЭФУ:

- ВВИП технологических магнетронных установок для напыления алмазных пленок с выходным напряжением 5 кВ мощностью 18 кВт;
- серия ВВИП с выходным напряжением 15÷25 кВ мощностью 15÷60 кВт для гиротронных комплексов исследовательского и прикладного назначения, работающих в режиме непрерывной или импульсно-периодической генерации СВЧ излучения;
- ряд ВВИП для зарядки емкостных накопителей энергии моноимпульсных лазерных установок с выходным напряжением 50÷70 кВ мощностью 0,5÷70 кВт.

В качестве примера на рис. 5 приведен внешний вид двух из находящихся в эксплуатации высоковольтных источников питания:

- ВВИП 25 кВ 60 кВт для гиротронного комплекса, генерирующего в непрерывном режиме мощность порядка 15 кВт на частоте 28 ГГц (рис. 5, а);

- ВВИП 70 кВ 8 кВт, использующегося для зарядки секции емкостного накопителя энергии сверхмощного газового лазера (рис. 5, б).



а)



б)

Рис. 5. Внешний вид ВВИП 25 кВ 60 кВт (а) и ВВИП 70 кВ 8 кВт (б)

#### Библиографический список

1. **Копелович, Е.А.** Концепция построения высоковольтных источников питания для мощных электрофизических установок // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды НГТУ. – Н.Новгород, 2009. Т. 77. С. 32–36.
2. **Курчик, Б.З.** Преобразователь для заряда емкостных накопителей энергии / Б.З. Курчик, А.Д. Покрываило, А.Н. Шварц // Приборы и техника эксперимента. 1990. №4.
3. **Kopelovich, E.A.** High voltage power supplies for high power vacuum electron devices / E.A. Kopelovich, A.U. Novikov, A.G. Razumov, M.M. Troitsky, F.A. Flat // Proceedings of the 8-th IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu International Conference Center, Japan, 2007. P. 339-340.
4. Патент на полезную модель № 94089 РФ, МПК Н 03 К 3/53. Зарядное устройство накопительного конденсатора / Копелович Е.А. Оpubл. в Бюллетене «Изобретения, полезные модели», 2010. № 13.

Дата поступления  
в редакцию 26.04.2011

**Е.А. Kopelovich**

#### **HIGH VOLTAGE TRANSISTOR-CAPACITOR POWER SUPPLIES FOR POWER ELECTROPHYSICAL INSTALLATIONS**

The conditions of the operating benefits of the high voltage power supplies (HVPS) based on the half-bridge transistor converter with dosaging capacitors effective operation are considered. The impact of the high voltage transformer stray parameters on the HVPS output power is investigated. It is shown the attraction of the two transformer converter variant. The realized HVPS examples based on this converter variant are reported.

*Key words:* high voltage power supply, electro physical installation, dosaging capacitor, converter, transformer.