

УДК 621.314

С.Ю. Панфилов¹, А.И. Чивенков¹, И.С. Панфилов², Н.Н. Вихорев¹**ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева¹,
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород²

Данная работа направлена на освещение проблемы предварительного проектирования электромагнитных компонентов импульсных преобразователей напряжения для радиоэлектронных устройств. В статье большое внимание уделено особенностям различных типов однотактных преобразователей, заключающиеся в режимах намагничивания, размагничивания и перемагничивания сердечников трансформаторов. Предложена методика выбора магнитопроводов по требуемому его объему или массе с учетом частных гистерезисных циклов работы сердечника, приведены необходимые для расчета выражения и соотношения параметров элементов.

Ключевые слова: дроссель, трансформатор, однотактный преобразователь, перемагничивание и размагничивание сердечника, транзистор, остаточная индукция, петля намагничивания, объем сердечника.

Из-за многообразия схемных (по принципу действия) и технических характеристик преобразователей постоянного напряжения в постоянное (ППН) зачастую не возможно для них использовать унифицированные серийно изготавливаемые электромагнитные компоненты (ЭМК) [1,2]. Оптимальным разрешением этой проблемы является разработка или использование унифицированных конструкций ЭМК и организация заказной системы их производства по техническим требованиям (условиям) заказчика. Поэтому актуальным остается совершенствование методик расчета ЭМК с учетом их режимов работы в ППН [3-5].

Существуют четыре основные схемы однотактных трансформаторных (с гальванической развязкой) ППН, различающихся по принципу действия [6-10]:

- тип P1 - с размагничивающей обмоткой W3 трансформатора по первичной стороне (рис. 1, а);
- тип P2 - с размагничивающей обмоткой W3 трансформатора по вторичной стороне (рис. 1, б);
- тип P1P2 - с размагничивающей обмоткой W3 трансформатора по первичной и перемагничивающей W4 по вторичной стороне (рис. 1, в);
- тип P2P2 - с размагничивающей W3 и перемагничивающей W4 обмоткой трансформатора по вторичной стороне (рис. 1, г).

Каждая из схем содержит по одному трансформатору и дросселю, но работающих в каждой из схем в различных режимах даже при одинаковых входных и выходных параметрах ППН.

В приведенных ППН передача энергии от первичного источника в нагрузку происходит только при намагничивании сердечника трансформатора в одну сторону, а частота следования импульсов напряжения на выходной фильтр равна частоте работы силового транзистора.

В ППН типов P1 и P2 сердечник трансформатора намагничивается (в интервалы времени включенного транзистора через обмотку W1) и размагничивается (в интервалы времени выключенного транзистора через обмотку W3) по частным гистерезисным циклам, причем мгновенные значения магнитной индукции b и намагничивающей силы h могут принимать только положительные значения, т.е. ток намагничивания трансформатора может принимать только положительные или нулевые значения. Предельным частным циклом намагничивания при этом будет являться петля намагничивания с координатами B_r (значение остаточной ин-

дукции кривой намагничивания материала сердечника) и B_H (значение индукции на начале изгиба кривой намагничивания материала сердечника).

Отличие ППН типа P2 от ППН типа P1 состоит в формировании направления рекуперации энергии, накопленной в трансформаторе в интервал времени включенного силового транзистора: в ППН типа P1 энергия возвращается в первичный источник, а в ППН типа P2 направляется в нагрузку.

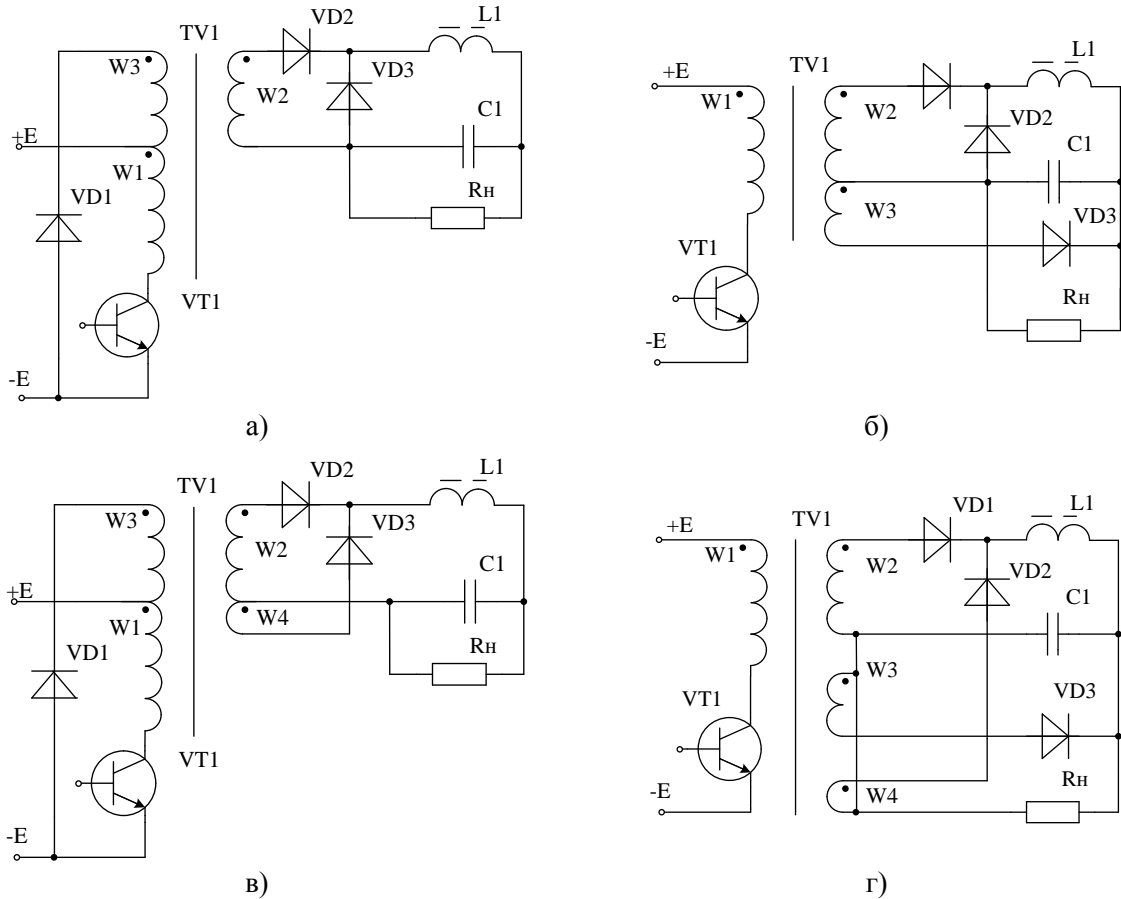


Рис. 1. Основные схемы однотактных трансформаторных ППН

Оптимальным режимом работы ППН обоих типов является режим, при котором ток дросселя не прерывается (не принимает нулевых значений), а ток намагничивания трансформатора, наоборот, должен обязательно принимать нулевые значения в интервал времени выключенного транзистора.

Для ППН типа P2 такими условиями является

$$L_{w1} > \frac{Ek_3}{2I_H k_I n_{21} f}; \tag{1}$$

$$n_{31} < \frac{Ek_3(1-k_3)}{2I_H k_I L_{w1} f} = (1-k_3)n_{21}; \tag{2}$$

$$L_{DP} > \frac{EK_3(1-\kappa_3)n_{21}}{2I_H(1-k_I)f}. \tag{3}$$

где E - входное напряжение;

n_{SM} - отношение числа витков s-обмотки к числу витков M-обмотки трансформатора;

k_3 - относительное время включенного состояния транзистора – параметр, обратно пропорциональный скважности Q ;

L_{W1} - индуктивность первичной обмотки трансформатора;

I_H - ток нагрузки преобразователя;

f - тактовая частота преобразования.

k_I - коэффициент, учитывающий отношение тока размагничивающей обмотки к току вторичной обмотки $W2$ (рекомендуемые значения $k_I < 0,1$);

$L_{ДР}$ - индуктивность дросселя фильтра.

В ППН типа Р1 ограничительные условия на значения индуктивности первичной обмотки трансформатора не налагаются и должны выполняться следующие условия:

$$n_{31} = 1; \quad (4)$$

$$L_{ДР} > \frac{E k_3 (1 - k_3) n_{21}}{2 I_H f}. \quad (5)$$

В ППН типов Р1П2 и Р2П2 принципиально возможно осуществить перемагничивание по предельной петле, т.е. мгновенные значения магнитной индукции b и намагничивающей силы h могут принимать не только положительные значения, но и отрицательные. Предельным циклом намагничивания сердечника трансформатора при этом будет являться петля намагничивания с координатами B_H и $-B_H$.

Перемагничивание сердечника трансформатора до отрицательных значений магнитной индукции осуществляется за счет энергии дросселя, накопленной в интервал времени включенного транзистора. Схемно это достигается тем, что трансформатор снабжается дополнительной обмоткой $W4$, включенной последовательно с дросселем. Ток дросселя протекает через обмотку $W4$ только в интервал времени выключенного транзистора.

В ППН типа Р1П2 энергия, накопленная в трансформаторе в интервал времени включенного транзистора, передается в первичный источник в интервал времени выключенного транзистора. Кроме того, в первичный источник возвращается и часть энергии дросселя. В ППН типа Р2П2 энергии трансформатора и дросселя передаются только в нагрузку.

Эффективное использование свойств преобразователей типов Р1П2 и Р2П2 достигается при обеспечении перемагничивания сердечника трансформатора к моменту очередного включения транзистора до отрицательных значений магнитной индукции, вплоть до предельной $-B_H$. При этом в интервал времени выключенного транзистора значения могут принимать и большие по модулю отрицательные значения, что на принципе работы не отражается.

Условием режима обеспечения отрицательных значений магнитной индукции в ППН типа Р1П2 является

$$L_{ДР} > \frac{E \left[k_3^2 (n_{31} n_{41} - 3 n_{43} - 4 n_{21} + 2 n_{41}) + 4 k_3 (n_{21} + n_{43}) - n_{43} \right]}{8 I_H f}. \quad (6)$$

Условием режима обеспечения предельного перемагничивания сердечника трансформатора в ППН типа Р1П2 является

$$L_{ДР} > \frac{E k_3 \left[(1 - k_3) (n_{21} - n_{41}) + k_3 n_{41} (1 + n_{31}) \right]}{2 (I_H - i_{ДР \min}) f}, \quad (7)$$

где $i_{ДР \min}$ - значение тока дросселя в момент очередного включения транзистора.

С учетом того, что

$$i_{ДР \min} > \frac{H_H I_{CP}}{W4}, \quad (8)$$

получим условие (7) как зависимость от типоразмера сердечника трансформатора

$$L_{ДР} = \frac{\mu_{СР}\mu_0 E k_3 k_{3\max} C n_{41} [(1 - k_3)(n_{21} - n_{41}) + k_3 n_{41}(1 + n_{31})]}{2f(\mu_{СР}\mu_0 n_{41} E I_H k_{3\max} - B_{II} l_{СР} S_{СТ} f B_{P k_{3\max}})}, \quad (9)$$

где H_{II} - значение намагничивающей силы, соответствующее точке изгиба кривой намагничивания;

$l_{СР}$ - средняя длина магнитопровода,

$S_{СТ}$ - площадь поперечного сечения магнитопровода;

$B_{P k_{3\max}}$ - перепад магнитной индукции сердечника трансформатора при $k_{3\max}$;

$k_{3\max}$ - максимальное относительное время включенного состояния транзистора.

Условием режима обеспечения отрицательных значений магнитной индукции в ППН типа Р2П2 является

$$L_{ДР} > \frac{E k_3 n_{21} L_{W1} [k_3 (n_{21} - n_{41}) - n_{21} (2 + n_{43} - k_3 n_{43})]}{E k_3 (2 + n_{43} - k_3 n_{43}) - 2 I_H f (2 n_{21} - n_{41}) L_{W1}}. \quad (10)$$

При предельном перемагничивании (в момент включения транзистора значение индукции соответствует режиму насыщения) возможны несколько вариантов работы сердечника трансформатора:

- ток намагничивания в момент времени выключения транзистора принимает имеет отрицательные значения (вариант 1);
- ток намагничивания в момент времени выключения транзистора принимает положительные значения (вариант 2).

Условие варианта 1

$$L_{ДР} = \frac{A_1 E k_{3\max} n_{41} [A_2 k_3 n_{41} + n_{21}^2 (1 - k_3)]}{2 A_1 (n_{21} - n_{41}) I_H k_{3\max} f - A_3 l_{СР} S_{СТ} f B_P}, \quad (11)$$

варианта 2

$$L_{ДР} = \frac{A_1 E k_3 [A_2 k_3 n_{41} + n_{21} (1 - k_3)]}{2 A_1 (n_{21} - n_{41}) I_H f - A_4 l_{СР} S_{СТ} f B_{II}}, \quad (12)$$

где B_P - заданный перепад магнитной индукции;

$$A_1 = \mu_{СР}\mu_0 k_{3\max} n_{41}; \quad (13)$$

$$A_2 = n_{21} + k_3 (1 - n_{41}); \quad (14)$$

$$A_3 = 2 n_{21} B_{II} k_{3\max} - k_3 B_{PAB} n_{41}; \quad (15)$$

$$A_4 = 2 n_{21} B_{PAB} k_3 - n_{41} (2 k_3 B_{PAB} - k_{3\max} B_{II}). \quad (16)$$

В [2] предлагается производить предварительный выбор сердечников дросселей (накопительных ЭМК) по эмпирическому выражению, используя понятие электромагнитной мощности и действующего значения токов дросселя. При этом действующее значение тока не в полной мере отражает реальные процессы, протекающие дросселе, поскольку соотношения действующего, максимального и минимального токов зависят от формы тока, которая в общем случае зависит от принципа действия ППН.

Предлагается целесообразным на начальном этапе проектирования дросселя, используя результаты расчета ППН, определять типоразмер сердечника по максимальному (пиковому) значению тока дросселя и его индуктивности.

Для этого, преобразуя выражение для определения индуктивности дросселя

$$L_{ДР} = \mu_{СР}\mu_0 \frac{S_{СТ}}{l_{СР}} W^2 \quad (17)$$

и закона полного тока

$$H_{\max} = \frac{I_{\max} W}{l_{CP}}, \quad (18)$$

получим выражение для требуемого объема сердечника дросселя

$$V_{CT} \geq S_{CT} l_{CP} = \frac{L_{ДР} I_{\max}^2}{\mu \mu_0 H_{\max}^2}, \quad (19)$$

где μ_{CP} – средняя относительная магнитная проницаемость материала сердечника;
 μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость;
 W – число витков ЭМК;
 H_{\max} – максимальная намагничивающая сила;
 I_{\max} – максимальный ток ЭМК.

Выражение (19) позволяет определить типоразмер сердечника дросселя по его минимальному допустимому объему или массе (при известной удельной массе материала).

Особенностью ППН типа Р2 является необходимость выполнить ряд условий для полного размагничивания трансформатора (до остаточной индукции B_r) при выключенном транзисторе и обязательному протеканию тока через дроссель. Это возможно? только если объем сердечника трансформатора будет соответствовать условию

$$V_{CT} \leq \frac{2\mu_{CP}\mu_0 E I_H \kappa_3 n_{21}}{B_p^2 f} \quad (20)$$

где B_p – рабочий размах индукции;

Для обеспечения непрерывности тока дросселя в ППН типа Р2 необходимо выполнить условие

$$V_{CT} \leq \mu_{CP}\mu_0 E \kappa_3 n_{21} \frac{2I_H L_{ДР} f - E \kappa_3 (1 - \kappa_3) n_{21}}{B_p^2 f^2 L_{ДР}}. \quad (21)$$

При проектировании трансформаторов для ППН типа Р1П2 для перемагничивания сердечника трансформатора сердечник должен удовлетворять условиям

$$V_{CT} \leq \frac{\mu_{CP}\mu_0 E \kappa_{3\max} n_{41} I_H}{B_p B_H f} \quad (22)$$

или

$$V_{CT} \leq \frac{\mu_{CP}\mu_0 E^2 \kappa_{3\max} n_{41} (n_{21} - n_{41})}{R_H B_p B_H f}, \quad (23)$$

где B_H – значение индукции на начале изгиба кривой намагничивания материала сердечника;

R_H – сопротивление нагрузки ППН.

Для трансформаторов ППН типа Р2П2 объем сердечника должен удовлетворять условиям

$$V_{CT} \leq \frac{2\mu_{CP}\mu_0 E \kappa_{3\max} n_{41} (n_{21} - n_{41}) I_H}{B_p f (2n_{21} B_H \kappa_{3\max} - \kappa_3 B_p n_{41})}, \quad (24)$$

или

$$V_{CT} \leq \frac{2\mu_{CP}\mu_0 E \kappa_{3\max} n_{41} (n_{21} - n_{41}) I_H \kappa_3}{B_H f [2n_{21} B_p \kappa_3 - n_{41} (2\kappa_3 B_p - \kappa_{3\max} B_H)]}, \quad (25)$$

Для ППН типа Р2 размах индукции B_p сердечника трансформатора не должен превышать $B_H - B_r$, а для ППН типов Р1П2 и Р2П2 – не более $2B_H$. Средняя относительная магнит-

ная проницаемость материала сердечника должна соответствовать выбранному частному циклу намагничивания (перемагничивания).

При выводе выражений были сделаны следующие допущения: не учитывались реальные параметры элементов и пульсации напряжения на конденсаторе.

В приведенных выражениях все величины имеют размерность системы СИ.

Выводы

В однотактных ППН с размагничиванием и перемагничиванием сердечника трансформатора возможны различные режимы работы, которые в общем случае характеризуются режимом работы дросселя выходного фильтра и намагничивания сердечника трансформатора. На режимы работы значительное влияние оказывает величина индуктивности выходного фильтра. Кроме того, на режимы работы ППН типов P2, P1П2 и P2П2 влияет величина индуктивности первичной обмотки трансформатора (эффективный объем сердечника трансформатора).

Получены аналитические выражения регулировочных характеристик для различных режимов работы ППН и выражения, позволяющие определить параметры преобразователей типов P и PП, соответствующие границам режимов работы. Погрешность полученных выражений не превышает 12-15% и позволяет проводить предварительный выбор параметров элементов ППН на начальной стадии проектирования силовой части источников вторичного электропитания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0073 о предоставлении субсидии от 05.06.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0073).

Библиографический список

1. **Чивенков, А.И.** Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети / В.И. Гребенщиков, А.П. Антропов, Е.А. Михайличенко // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №1. – <http://www.ivdon.ru/magazine/issue/107?page=3>
2. **Соснина, Е.Н.** Нормирование энергопотребления образовательных учреждений на основе нейросетевого подхода. / А.В. Шалухо, Р.Ш. Бедретдинов, И.А. Липужин // Инженерный вестник Дона. 2013. h№ 3. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1841>.
3. **Severns R.** Modern DC – to – DC switchmode converter circuits / G. Bloom // Van Nostrand Reinhold Co, 1985.
4. **Severns R.** Swithcmode Converter Topologies-Make Them Work For You!, Intersil, Inc., Application Note AO35, 1980.
5. **Тылес М.Г.** Пути повышения массогабаритных показателей однотактных преобразователей постоянного напряжения с гальванической развязкой / С.Ю. Панфилов, И.В. Полетаев, А.В. Тюрин // Проблемы преобразовательной техники: тез. докл. 4 Всесоюз. науч.-техн. конф., Черновцы, сент. – Киев. 1987. Ч. 2. – С. 222–224.
6. **Александров, В.В.** К расчету накопительных магнитных элементов импульсных преобразователей напряжения / М.Г. Тылес, С.Ю. Панфилов // Техника средств связи. Сер. ТРС. – 1982. – Вып. 9 (29) – С. 75–78.
7. **Тылес, М.Г.** Однотактные преобразователи напряжения с размагничиванием и перемагничиванием сердечника трансформатора / С.Ю. Панфилов, И.В. Полетаев, А.В. Тюрин // Специальная техника средств связи. Сер. СВЭП. – 1983. – Вып. 1. – С. 57–62.
8. **Тылес, М.Г.** Унифицированные полярно-инвертирующие преобразователи напряжения в гибридно-пленочном исполнении / С.Ю. Панфилов, А.В. Тюрин // Специальная техника средств связи. Сер. СВЭП. – 1984. – Вып. 1. – С. 39–47.
9. **Панфилов, С.Ю.** Схема управления силовым транзистором на основе однотактного трансформаторного преобразователя / Н.Н. Вихорев, И.С. Панфилов, А.И. Чивенков, Д.Н. Лапаев

// Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции / НГТУ. – Н.Новгород. – 2014. – С. 186–189.

10. **Вихорев, Н.Н.** Источник питания катода установки ионного легирования / И.С. Панфилов, А.И. Чивенков, С.Ю. Панфилов // Современные технологии и технический прогресс: сб. статей по материалам IV Международной научно-практической конференции (22 июля 2015 г., город Воронеж). – 2015. – С. 62–65.

*Дата поступления
в редакцию 27.04.2016*

S.Y. Panfilov¹, A.I. Chivenkov¹, I.S. Panfilov², N.N. Vikhorev¹

REQUIREMENTS FOR THE PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC COMPONENTS DC CONVERTERS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev¹,
JSC "SIE" POLET²

Purpose: This work aims to cover preliminary design problems of components of electromagnetic pulse voltage converters for electronic devices.

Design/methodology/approach: Synthesis of analytical expressions, allowing to make an indicative calculation of the DC/DC converters.

Findings: Analytical expressions adjusting characteristics for various modes of converters DC and expression, allowing to define the parameters of single-ended converters of various types corresponding to the boundaries of operating modes.

Research limitations/implications: The design of the power unit with a power supply of electronic equipment.

Originality/value: A selection method for electromagnetic components of magnetic circuits in the required volume subject private hysteresis cycles of their work, are given the necessary mathematical expressions.

Key words: inductor, transformer, single-ended converter, magnetization and demagnetization of the core transistor, residual induction, magnetization loop, the volume of the core.