

Новый DC/DC-преобразователь с нулевыми пульсациями и интегрированными магнитопроводами (A new zero-ripple switching DC-to-DC converter and integrated magnetics)

Для питания основной массы радиоэлектронной аппаратуры требуется в какой-либо форме энергия постоянного тока разных уровней напряжения и мощности. Физически невозможно реализовать управляемый трансформатор постоянного напряжения, но он может служить идеальным конечным результатом при проектировании соответствующих преобразователей (конверторов).

Нетрудно заметить, что ни одна из классических схем конверторов (рис.1) не обладает главной отличительной чертой идеального трансформатора постоянного напряжения, а именно - не обеспечивает непрерывности (постоянства) потребления энергии и передачи ее в нагрузку. Разрывность токов (входного, выходного или обоих одновременно) вызывает электромагнитные помехи и ухудшает качество электроэнергии, в результате чего существенно ограничена область применения импульсных источников питания.

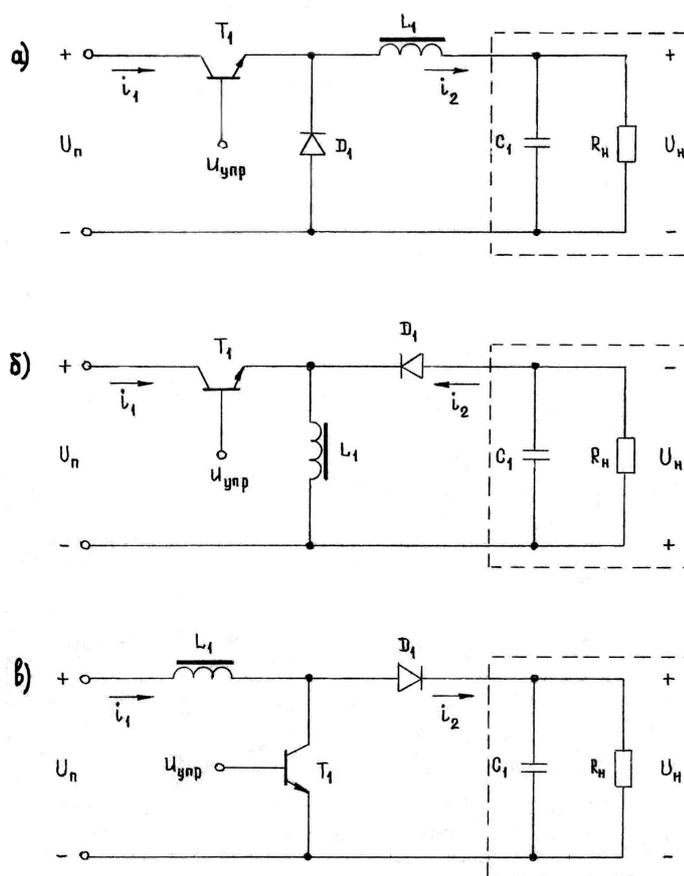


Рис. 1.

Отказ от традиционных методов проектирования конверторов [1] означает поиск новых импульсных схем с непрерывным характером потребления и передачи энергии. Причем сразу ясно, что стремление сохранить высокий КПД неизбежно ведет к насыщению силовой части конвертора реактивными элементами. Но именно это обстоятельство способствовало появлению революционной идеи интеграции магнитных компонентов, открывающей перед импульсными устройствами новые перспективы.

Рассмотрим схему конвертора [2], в котором осуществляется непрерывная передача энергии от первичного источника в нагрузку (рис.2).

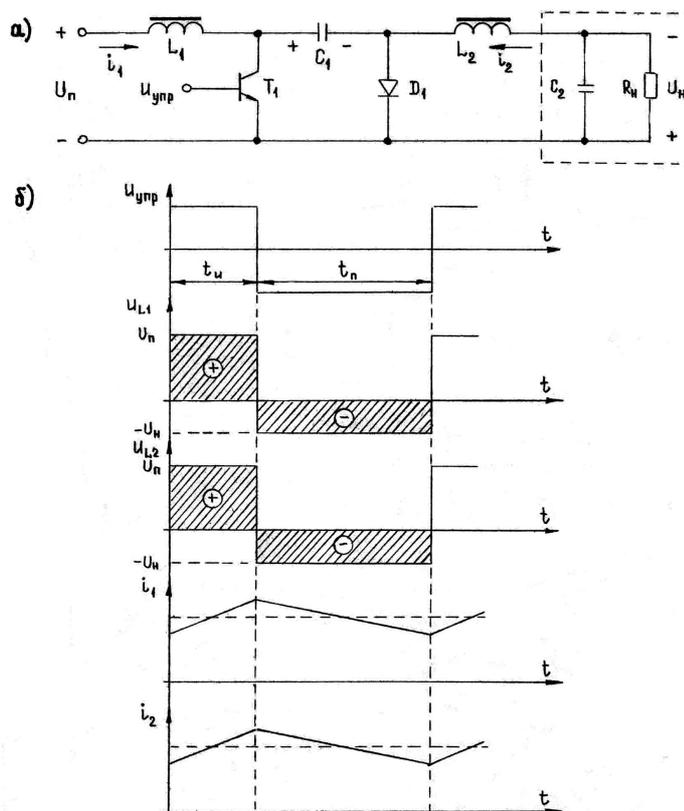


Рис. 2.

На интервале времени t_n , когда транзистор T1 заперт, конденсатор C1 заряжается входным током i_1 дросселя L1 через диод D1, а ток дросселя L2 замыкается через тот же диод и нагрузку. На интервале t_u , когда транзистор T1 открыт, конденсатор C1 разряжается на нагрузку током i_2 , а ток i_1 дросселя L1 замыкается через транзистор и источник питания.

Пренебрегая пульсациями напряжений на конденсаторах, запишем баланс вольт-секундных интегралов для каждого дросселя:

$$U_n t_u = (U_{C1} - U_n) t_n,$$

$$(U_{C1} - U_n) t_u = U_n t_n.$$

Отсюда

$$U_{C1} = U_n \left(1 + \frac{t_u}{t_n} \right) = U_n \left(1 + \frac{t_n}{t_u} \right).$$

Следовательно,

$$U_n = U_n \frac{t_u}{t_n},$$

$$U_{C1} = U_n + U_n,$$

а эюры напряжений на дросселях (рис. 2б) полностью совпадают.

Последнее обстоятельство является предпосылкой для выполнения обоих дросселей на едином магнитопроводе (рис. 3).

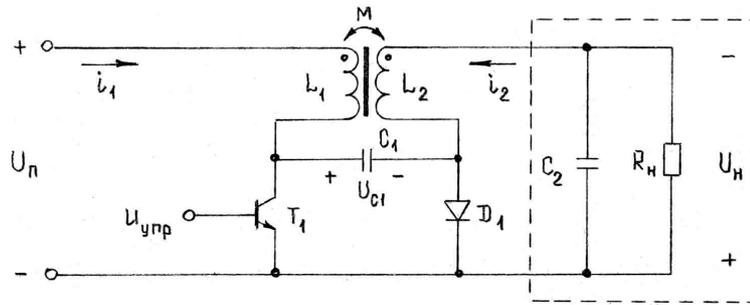


Рис. 3.

Для каждой обмотки связанного дросселя:

$$U_s = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \quad (1)$$

$$U_s = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}, \quad (2)$$

где U_s - напряжение на обмотках:

$$U_s = U_n \text{ на интервале } t_u,$$

$$U_s = U_n \text{ на интервале } t_n;$$

$$L = \mu \frac{w^2 S}{l} - \text{индуктивность обмотки};$$

μ - магнитная проницаемость материала магнитопровода;

w - число витков обмотки;

S и l - соответственно площадь сечения и длина средней линии сердечника;

$$M = \frac{k}{n} L_1 = kn L_2 - \text{взаимная индуктивность обмоток};$$

k - коэффициент магнитной связи обмоток;

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} - \text{отношение чисел витков обмоток.}$$

Представляет интерес рассмотрение трех частных случаев.

1. Получение одинаковых пульсаций входного и выходного токов, то есть $\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt}$.

Разделив (1) на (2), получим:

$$\frac{L_1 + M}{L_2 + M} = 1 \text{ или } n^2 \frac{1 + \frac{k}{n}}{1 + kn} = 1.$$

Отсюда $n = 1$. Таким образом, при $L_1 = L_2$ ($w_1 = w_2$) пульсации входного и выходного токов одинаковы:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} = \frac{U_s}{(1+k)L_2}.$$

Анализ этого выражения показывает, что по сравнению с исходной схемой пульсации токов уменьшены в $(1+k)$ раз, а в предельном случае ($k=1$) – в два раза при прочих равных условиях.

2. Получение нулевых пульсаций входного тока, то есть $\frac{di_1}{dt} = 0$.

Разделив (1) на (2), получим:

$$\frac{M}{L_2} = 1 \text{ или } kn = 1.$$

Отсюда $n = \frac{1}{k}$.

Пульсации выходного тока при этом остаются на прежнем уровне:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{U_s}{L_2}.$$

3. Получение нулевых пульсаций выходного тока, то есть $\frac{di_2}{dt} = 0$.

Разделив (1) на (2), получим:

$$\frac{L_1}{M} = 1 \text{ или } \frac{n}{k} = 1.$$

Отсюда $n = k$.

Пульсации выходного тока при этом остаются на прежнем уровне:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_s}{L_1}.$$

Таким образом, относительным изменением n и k можно регулировать пульсации токов i_1 и i_2 вплоть до полного устранения их по входу или выходу. Причем условие получения нулевой пульсации не зависит от режима работы конвертора, то есть скважности, частоты переключений, напряжения питания и тока нагрузки.

Объединение дросселей возможно и в других импульсных структурах при условии, что напряжения на объединяемых дросселях пропорциональны друг другу [3]. Форма напряжений не существенна. Например, если коэффициент трансформации введенного в конвертор развязывающего трансформатора [4] (рис.4а) равен n_{mp} , то напряжение на дросселе L2 отличается от напряжения на дросселе L1 в n_{mp} раз. Во столько же раз должны отличаться числа витков связанного дросселя (рис.4б) для получения одинаковых пульсаций входного и выходного токов.

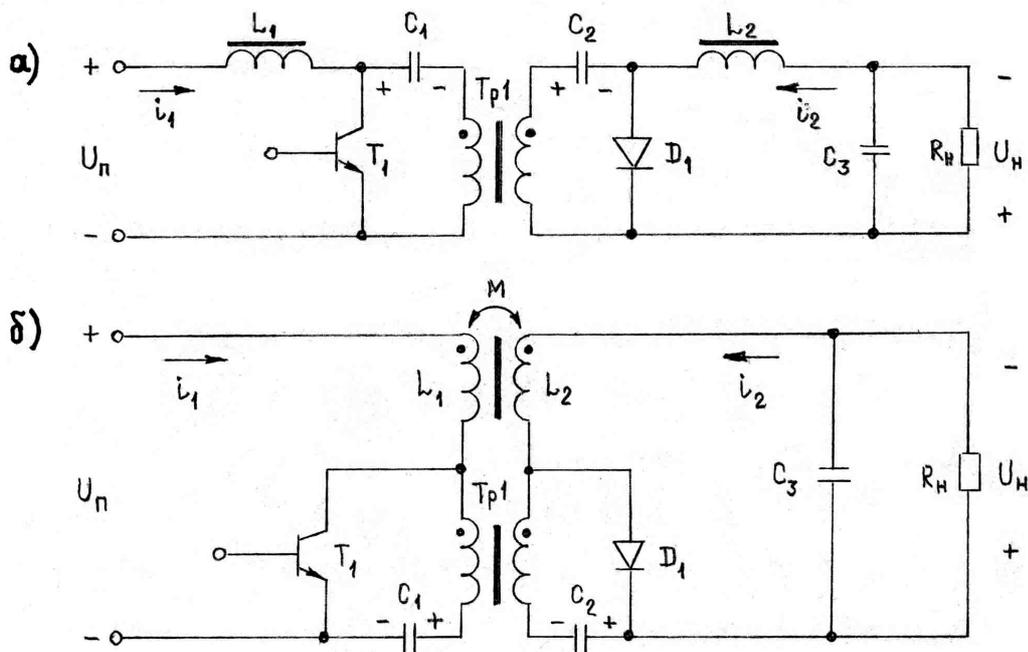


Рис. 4.

Возможность для объединения дросселей имеется и в многоканальном конверторе (рис.5). Причем дроссели можно объединять группами, например, как в [5, 6], где входной и один из выходных дросселей объединены с целью получения нулевой пульсации входного тока, тогда как другой связанный дроссель обеспечивает нулевую пульсацию на одном из выходов.

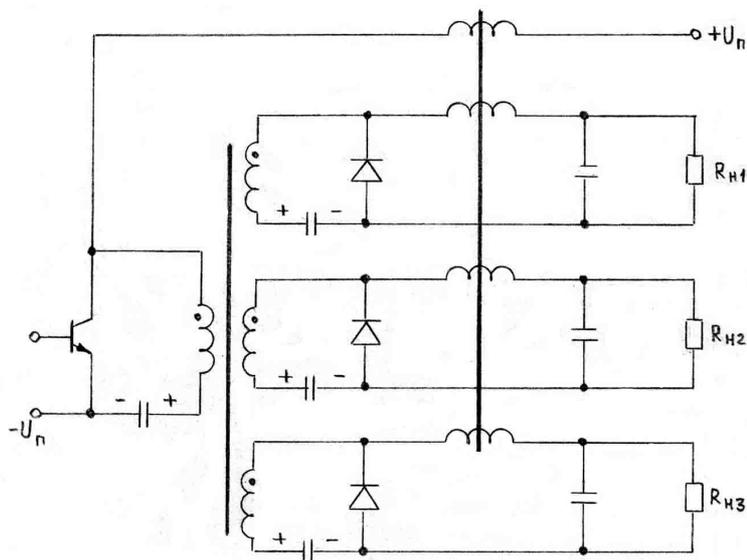


Рис. 5.

Связанный дроссель – мощное средство микроминиатюризации конверторов. Как показано в [7], применение связанного дросселя вместо двух отдельных позволяет при тех же пульсациях и потерях в меди почти вдвое сократить объем магнитного материала, а при тех же затратах магнитного материала – примерно вдвое уменьшить потери в меди и более рационально использовать конструктивный объем. Возможность же получения нулевых пульсаций тока при конечных размерах реактивных элементов является совершенно уникальной.

Последовательное соединение двух конверторов со связанными дросселями (рис.6) позволяет устранить пульсации входного и выходного токов одновременно. Но это далеко не лучшее решение, поскольку не только вводится двойное преобразование энергии, но и усложняется схема управления.

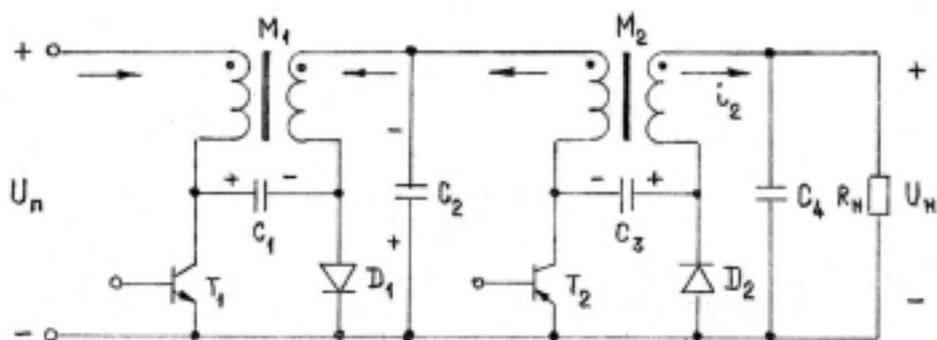


Рис. 6.

На рис. 7 представлена схема с последовательным соединением двух связанных дросселей.

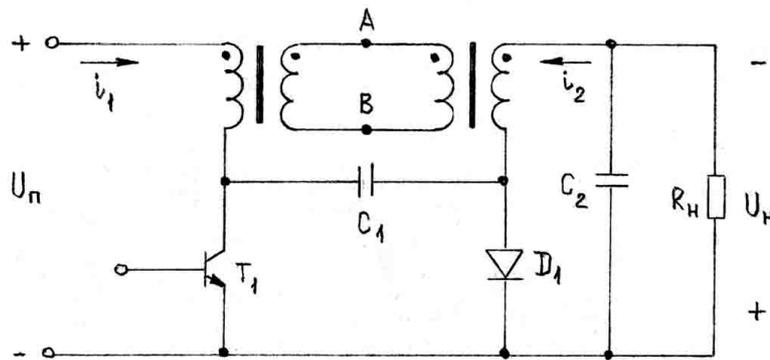


Рис. 7.

Кажется, что выбором $n_1 = \frac{1}{k_1}$ и $n_2 = k_2$ можно устранить пульсации как входного, так и выходного токов. Однако напряжение между точками А и В зависит от тех же n_1 и n_2 , поэтому два связанных дросселя работают как один, а нулевые пульсации можно получить либо на входе устройства либо на выходе. Для того, чтобы эта схема работала должным образом, между точками А и В требуется включить независимый источник импульсного напряжения, пропорционального напряжением на первичной обмотке первого связанного дросселя и вторичной обмотке второго.

Поставленным условиям удовлетворяет напряжение на дополнительном дросселе L [4] (рис. 8).

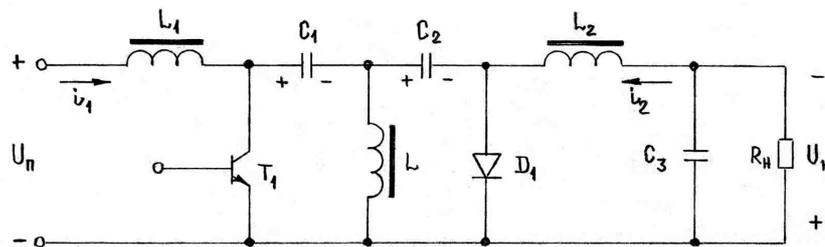


Рис. 8.

Действительно, записав баланс вольт-секундных интегралов для дросселей, получим:

$$U_n t_u = (U_{C1} + U_{C2} - U_n) t_n,$$

$$U_{C1} t_u = U_{C2} t_n,$$

$$(U_{C1} + U_{C2} - U_n) t_u = U_n t_n.$$

Отсюда после несложных преобразований:

$$U_{C1} = U_n,$$

$$U_{C2} = U_n,$$

$$U_n = U_n \frac{t_u}{t_n}.$$

Следовательно, напряжения на всех трех дросселях полностью идентичны. Дополнительный дроссель L может быть связан с дросселем L1 для получения нулевой пульсации входного тока или с дросселем L2 для получения нулевой пульсации выходного тока.

Ничего не изменится при замене дополнительного дросселя L двумя дросселями La и Lb, включенными параллельно. Но если дроссель La связать с L1, а дроссель Lb – с L2, то можно получить нулевые пульсации как входного, так и выходного токов одновременно [8] (рис. 9а).

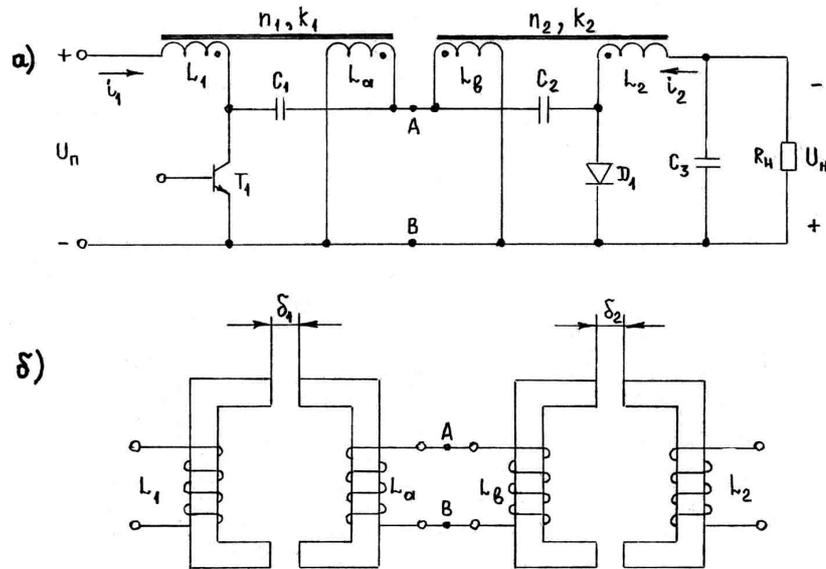


Рис. 9.

Изменяя коэффициент связи k_1 в первом связанном дросселе путем регулирования воздушного зазора δ_1 (рис. 9б), можно добиться $n_1 = \frac{1}{k_1}$ и, следовательно, нулевых пульсаций на входе. Изменяя коэффициент связи k_2 во втором связанном дросселе путем регулирования воздушного зазора δ_2 , можно добиться $n_2 = k_2$ и, следовательно, нулевых пульсаций на выходе. Обе регулировки независимы друг от друга.

Пропорциональность напряжений на обмотках связанных дросселей является предпосылкой для объединения их магнитопроводов [8] (рис. 10а). Конструкция интегрального магнитопровода (рис. 10б) должна обеспечивать отсутствие магнитной связи между обмотками L1 и L2.

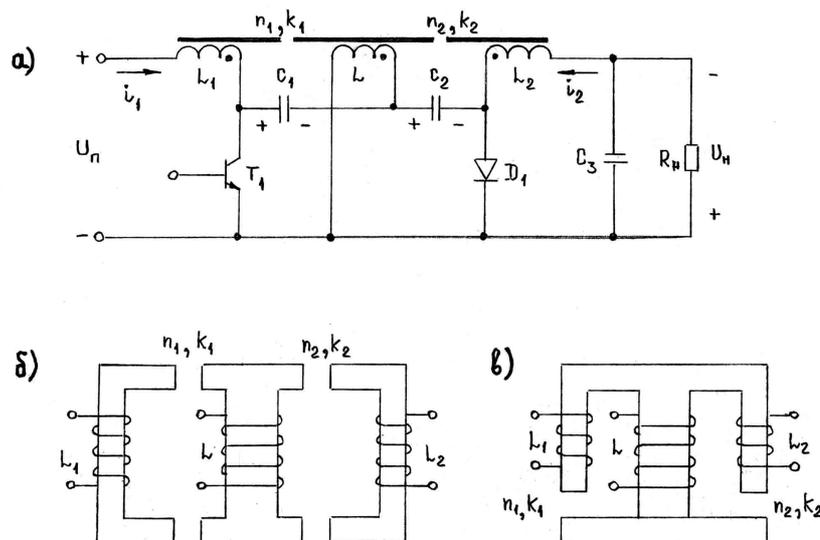


Рис. 10.

Наконец, разделив обмотку L на две, получаем конвертор с развязкой выхода от входа по постоянному току [7] (рис. 11).

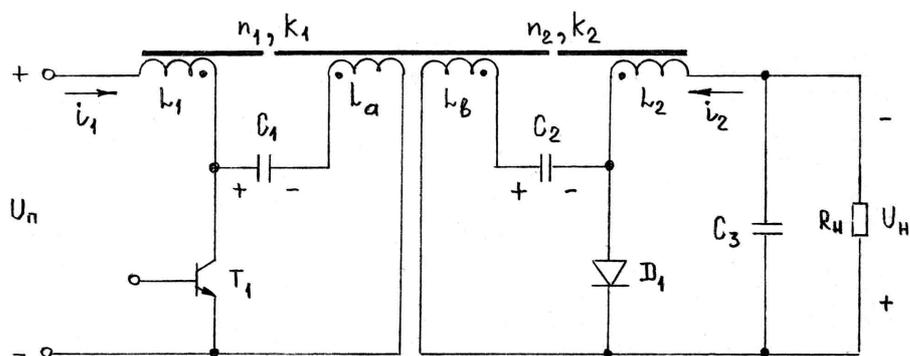


Рис. 11.

Таким образом, трансформатор теперь не только гальванически развязывает входные и выходные цепи, но и выполняет функции связанного дросселя, обеспечивая нулевые пульсации входного и выходного токов. Конструкция магнитопровода остается прежней (рис. 10б, в).

В двухканальном конвертере [7] (рис. 12а) одна магнитная цепь с шестью соответствующим образом связанными обмотками дает возможность обеспечить нулевые пульсации как на входе устройства, так и на обоих его выходах одновременно. Возможная конструкция магнитной системы показана на рис. 12б [9].

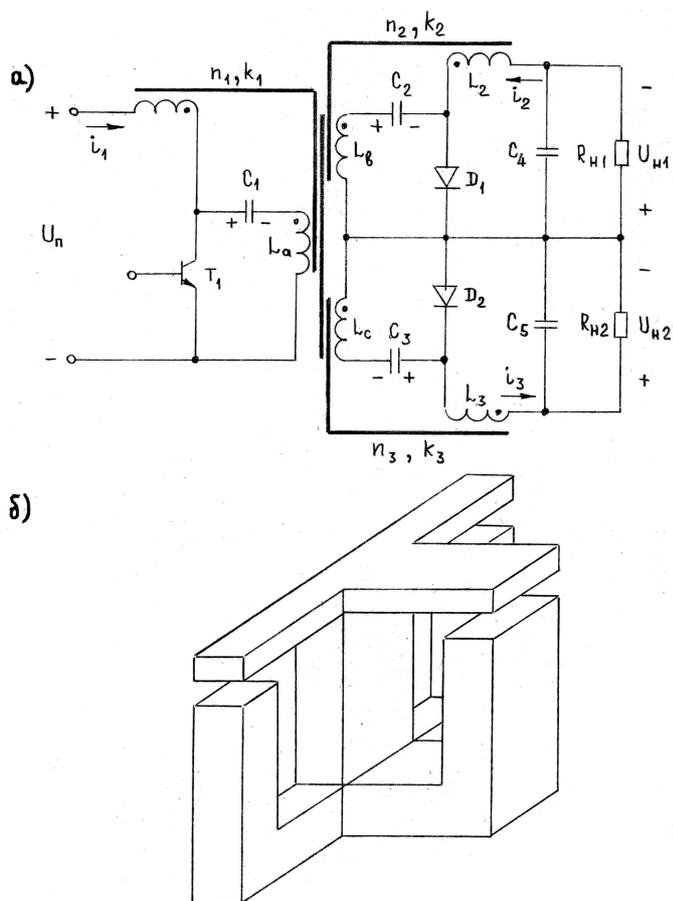


Рис. 12.

Если нулевые пульсации не требуются, например, на входе (рис. 13), то может быть использована более простая форма сердечника (рис. 10в), причем обмотка входного дросселя должна располагаться на средней части магнитопровода [7].

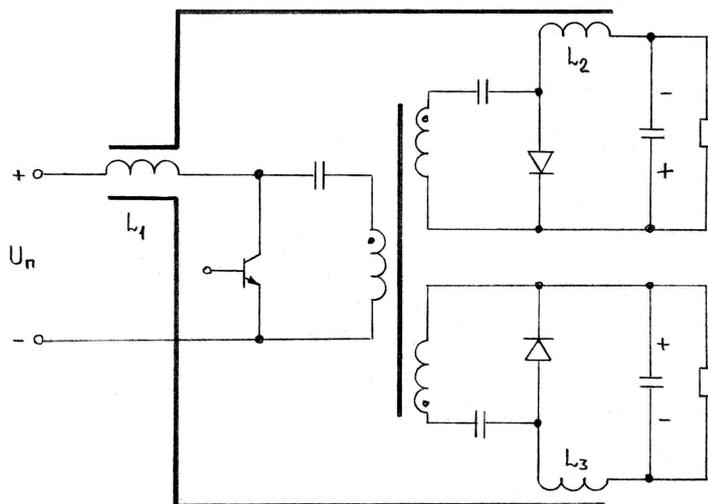


Рис. 13.

Еще несколько интересных схем многоканальных конверторов с нулевыми пульсациями на обеих сторонах с детальным анализом и описаниями реальных конструкций можно найти в [5, 6, 10, 11].

Таким образом, подводя итог изложенному выше, можно констатировать, что результатом разработки импульсных устройств с непрерывным характером передачи энергии является не только некоторое количество схем, но и новая идея интеграции магнитных систем, которая может быть с успехом применена к разнообразным существующим импульсным структурам [12-15] (рис. 14, 15, 16) и при разработке новых.

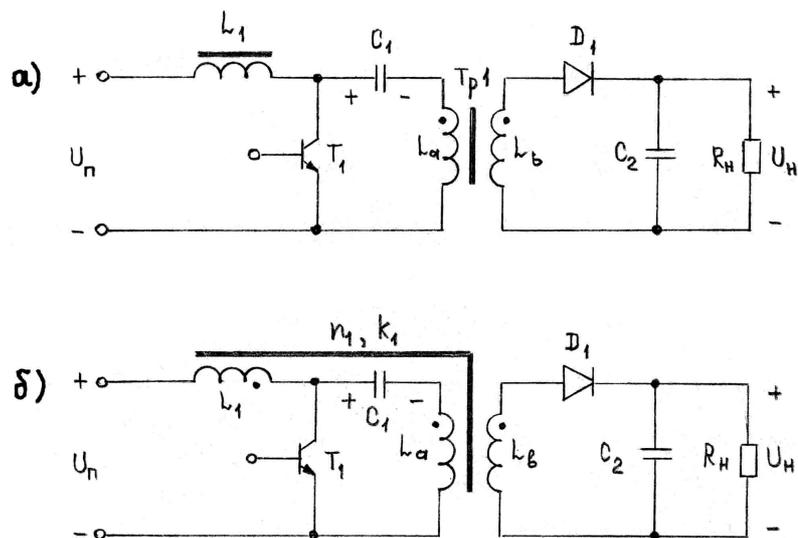


Рис. 14.

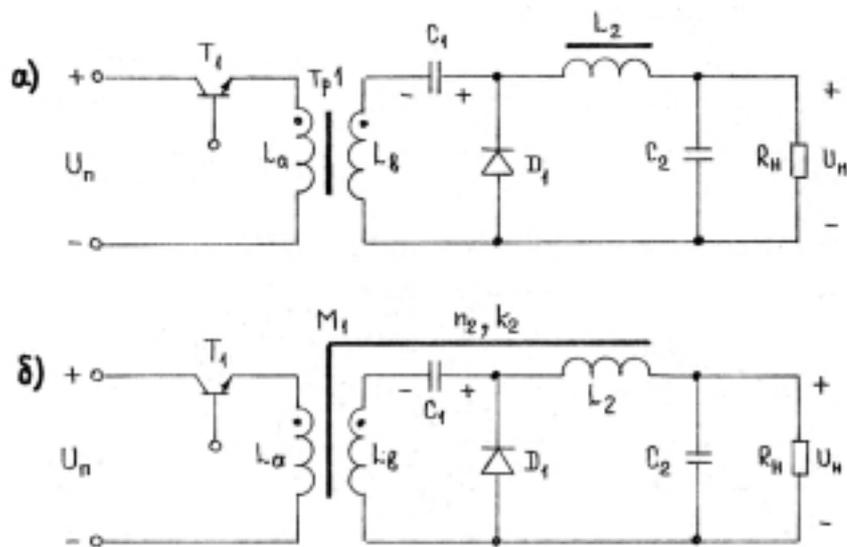


Рис. 15.

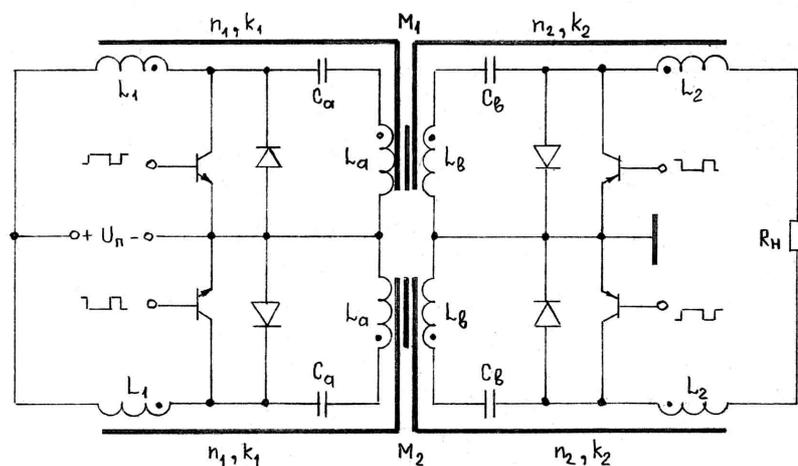


Рис. 16.

Первым шагом на пути интеграции магнитных компонентов следует считать объединение магнитопроводов двух отдельных дросселей конвертора [3], что позволило при том же качестве энергии уменьшить размеры, вес и потери. В результате дальнейшего распространения новой идеи интеграции подверглись такие разные магнитные компоненты как дроссели и трансформаторы. Получено новое уменьшение размеров, веса и потерь энергии. Наконец, применение новой идеи позволяет свести к нулю пульсации входного и выходных токов и реализовать почти идеальный преобразователь энергии постоянного тока, что практически невозможно при дискретном исполнении дросселей и трансформаторов.

При желании можно провести интересную аналогию между интеграцией магнитных компонентов и интеграцией полупроводниковых структур. Подобно тому, как в свое время полупроводниковые элементы (диоды, транзисторы) были освобождены от своих собственных корпусов и помещены в один общий, образуя электрическую схему (твердотельную или гибридную), магнитные компоненты (дроссели, трансформаторы) должны быть освобождены от своих собственных сердечников и выполнены на едином (интегральном) магнитопроводе, образуя магнитную схему ...

Литература

1. Peter Wood. General Theory of Switching Power Converters. – IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 1979 Records, pp. 3-10 (IEEE Publication 79CH1461-3AES).
2. Slobodan Cuk and R.D. Middlebrook. A New Optimum Topology Switching DC-to-DC Converter. – IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 1977 Records, pp. 160-179 (IEEE Publication 77CH1213-8AES).
3. Slobodan Cuk. Switching DC-to-DC Converter with Zero Input or Output Current Ripple. – IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – 1978 Records, pp. 1131-1146 (IEEE 78CH1346-61A).
4. R.D. Middlebrook and Slobodan Cuk. Isolation and Multiple Output Extensions of a New Optimum Topology Switching DC-to-DC Converter. – IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 1978 Record, pp. 256-264 (IEEE Publication 78CH1337-5AES).
5. G.E. Bloom and A. Eris. Practical Design Considerations of Multi-Output Cuk Converter. – IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 1979 Record, pp. 133-146 (IEEE Publication 79CH1461-3AES).
6. G.E. Bloom, A. Eris and R. Ruble. Modelling, Analysis and Design of a Multi-Output Cuk Converter. – Proc. Seventh National Solid-State Power Conversion Conference, pp. II.1-II.19, March 1980.
7. Slobodan Cuk. A New Zero-Ripple Switching DC-to-DC Converter and Integrated Magnetics. – IEEE, 1980, Publication 80CH1529-7.
8. Slobodan Cuk. DC-to-DC Converter with Zero Input and Output Current Ripple and Integrated Magnetics Circuits. – US Patent Application, March 30, 1979.
9. Hiromitsu Hirayama. Simplifying Switched Mode Converter Design with a New Variable Leakage Transformer Topology. – Proc. Seventh National Solid-State Power Conversion Conference (Powercon 7), pp. E1.1-E1.10, March 1980.
10. Loman Rensink. Switching Regulator Configurations and Circuit Realisations. – PhD thesis, Californis Institute of Technology, December 1979.
11. G.E. Bloom, A. Eris. Modelling and Analysis of a Multi-Output Cuk Converter. – IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 1980, Atlants, Georgia.
12. Slobodan Cuk and Robert W. Erickson. A Conceptually New High-Frequency Switched-Mode Amplifier Technique Eliminates Current Ripple. – Proc. Fifth National Solid-State Power Conversion Conference (Powercon 5), pp. G3.1-G3.22, May 1978.
13. Slobodan Cuk. General Topological Properties of Switching Structures. – IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1979 Record, pp. 109-130.
14. Slobodan Cuk. Push-Pull Switching Power Amplifier. – US Patent 4.186.437, January 29, 1980. Foreign patents pending.
15. R.P. Massey and E.C. Snyder. High-Voltage Single-Ended DC-DC Converter. – IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1977 Record, pp. 156-159.

Авторизованный перевод – С.М. Ненахов
E-mail: info@apelsinn.ru

*Опубликовано в приложении к журналу «Компоненты и технологии»
«Силовая электроника», 2004 г., №2, с. 62-64 и 2005 г., №1, с. 77-79.*