

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Яськив В. И.

*Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь,
Украина*

Предлагаются основные принципы построения источников и систем вторичного электропитания бортовой и наземной аппаратуры космического назначения, основанные на использовании новых высокочастотных аморфных сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса. Раскрыт принцип работы импульсных регуляторов на основе магнитных ключей. Проведен их сравнительный анализ с транзисторными аналогами. Показана возможность создания многоканальных источников питания с равноценными и независимыми выходными каналами, развита идея реализации структуры бортовой системы электропитания с использованием высокочастотной бортовой сети и применением импульсных регуляторов на основе магнитных ключей. Приведены основные технические параметры разрабатываемых источников питания.

Введение

Надежная работа бортовой и наземной радиоэлектронной аппаратуры космического назначения в значительной степени определяется характеристиками и структурой ее энергетического обеспечения, в частности источников и систем вторичного электропитания (ИВЭП и СВЭП). Основная их функция — преобразование электрической энергии с целью согласования параметров потребителей с параметрами первичных источников электрической энергии (батарей, аккумуляторов, первичных преобразователей) в широком диапазоне изменения возмущающих факторов.

Недостатки полупроводниковых приборов, используемых в качестве регулирующих силовых элементов импульсных преобразовательных устройств, вынуждают искать альтернативные пути построения ИВЭП и СВЭП.

Постановка задачи

К импульсным ИВЭП выдвигаются следующие требования:

- высокое качество выходных напряжений (в случае стабилизатора напряжения) в 100 % диапазоне изменения тока нагрузки;
- низкий уровень электромагнитных помех (ЭМП);
- высокие динамические характеристики;
- широкий температурный рабочий диапазон;
- функциональная гибкость;
- технологичность и ряд других.

Кроме того, потребитель часто нуждается в нескольких уровнях выходных напряжений с разными диапазонами изменения их тока нагрузки. Разработка такого рода устройств и систем ведется с учетом их соответствия следующим критериям: обеспече-

ния функциональных параметров, эффективности, надежности, массогабаритных показателей, цены.

Принцип работы магнитного ключа

Дроссель насыщения (ДН) ВМУ включают в разрыв между выводами вторичных обмоток высокочастотного силового трансформатора (ВСТ) и анодами диодов высокочастотного выпрямителя [1, 2]. Такую структуру у вторичных цепях ИВЭП вместе с соответствующей системой управления именуют импульсным стабилизатором напряжения на магнитных ключах (ИСН на МК). Базовая схема ИСН на МК приведена на рис. 1. Осциллограммы, объясняющие принцип работы МК, показаны на рис. 2: e — э.д.с. вторичной обмотки ВСТ; U_{TS} — напряжение на дросселе насыщения магнитного ключа; I — ток нагрузки в дросселе насыщения в насыщенном состоянии. На рис. 3 приведена идеализированная форма прямоугольной петли гистерезиса материала дросселя насыщения, где стрелкой указана траектория изменения его магнитного состояния в течение одного периода.

Рабочий цикл МК состоит из двух полупериодов: управления (при отрицательном полупериоде входного переменного напряжения) и рабочего (при положительном). В управляющий полупериод происходит размагничивание магнитопровода ДН на величину ΔB_y от уровня индукции насыщения B_s до уровня B_1 (см. рис. 3) под действием выходного напряжения стабилизатора U_H и э.д.с. E вторичной обмотки ВСТ в режиме источника тока с ограничением скорости перемагничивания. Рабочий полупериод состоит из двух участков. На первом происходит перемагничивание в режиме источника э.д.с. от запомненного значения индукции B_1 до индукции насыщения B_s . После достижения дросселем своего насыщения в момент времени $\pi - \alpha$ через него начинает протекать ток нагрузки.

В целом характеристики ИСН на МК определяются параметрами материала магнитопровода МК. К основным и контролируемым в процессе производства параметрам высокочастотных аморфных сплавов с ППГ относятся: индукция насыщения B_s , напряженность поля полного перемагничивания $H_{пп}$ (определяются по динамическим кривым размагничивания), коэффициент прямоугольности $K_{п}$ напряжение перемагничивания на один виток U_1 на заданной частоте. Так, например, для материала 84 КХСР 0,015 при перемагничивании его на частоте 50 кГц они следующие: $B_s=0.7$ Тл, $H_{пп} = 10$ А/м, $K_{п} > 0.9$, $U_1 = 1$ В/виток.

Таким образом, регулирование (стабилизация) выходного напряжения (тока) осуществляется широтно-импульсной модуляцией магнитного ключа в функции глубины размагничивания ΔB_y магнитопровода ДН. Вследствие того, что изменение выходного напряжения ВМУ является функцией тока в предыдущий управляющий полупериод, его можно рассматривать как звено запаздывания. Время запаздывания равно полупериоду частоты питающего напряжения. Поэтому ВМУ — безинерционное звено с за-

паздыванием на полпериода рабочей частоты, передаточная функция которого имеет вид

$$W_{TS} = K_R e^{-pT/2},$$

где T — период рабочей частоты коммутации, $K_R = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_y$ — передаточное сопротивление магнитного усилителя, ΔI_y — приращение тока управления, $\Delta U_{\text{вых}}$ — соответствующее приращение выходного напряжения магнитного усилителя (напряжение на нагрузке).

Через параметры магнитного ключа K можно выразить следующим образом

$$K_R = \frac{U_1 W^2}{H_{\text{нм}} l} = r_B W^2$$

где W — количество витков магнитного усилителя, l — длина магнитной линии, r_B — сопротивление на один виток.

Рассмотренная схема ИСН на МК по сравнению с транзисторными аналогами обладает высокими динамическими характеристиками, так как из цепи регулирования исключены сложная схема управления полупроводниковым ключом и высокочастотный силовой трансформатор.

Сравнительный анализ магнитного ключа с транзисторным

МК обладает следующими преимуществами:

- МК – ключ переменного напряжения (присуще импульсным ИВЭП);
- не критичен к форме входного высокочастотного переменного напряжения;
- коэффициент усиления по току до 1000 (не более 10 для биполярного транзистора);
- простота схемы управления (1-2 транзистора в линейном режиме – для транзистора схема управления, требующая своего питания);
- не является источником электромагнитных помех;
- служит фильтром входных помех (как в ненасыщенном, так и в насыщенном состоянии);
- высокий к.п.д. (99 %), потери не зависят от тока нагрузки;
- высокая радиационная и механическая стойкость;
- не требует схем защиты (сам служит элементом защиты высокочастотного транзисторного преобразователя);
- многофункциональность: усилитель мощности, силовой коммутационный элемент, широтно-импульсный модулятор, интегратор, компаратор, элемент защиты.

Сравнительный анализ ИВЭП на основе МК с транзисторными аналогами

Преимущества ИВЭП на основе ИСН на МК определяются именно преимуществами МК и в сравнении с транзисторными аналогами они следующие:

- возможность реализации многоканальных ИВЭП с равноценными и независимыми выходными каналами с 100 % диапазоном изменения тока нагрузки;
- допускают широкий диапазон изменения входного напряжения;
- высокая удельная мощность;
- высокое качество выходных напряжений (отсутствуют высокочастотные пики и низкочастотная составляющая);
- высокие динамические характеристики;
- высокая эффективность;
- низкая себестоимость (в несколько раз дешевле);
- высокая радиационная и механическая стойкость;
- выше надежность как за счет физической природы МК, так и существенного упрощения схемотехнических решений;
- высокий уровень унификации – возможность использования одного типоразмера МК и одних и тех же схемотехнических решений для реализации ИВЭП в широком диапазоне изменения выходных параметров.

Предлагаемая структура бортовой СВЭП космических аппаратов.

Как правило, бортовые СВЭП имеют следующую структуру:

- первичные бортовые источники электрической энергии;
- первичные преобразователи (полупроводниковые);
- источники вторичного электропитания.

Эта структура реализует принцип распределенного электропитания – каждому потребителю свой преобразователь, широко используемый в мировой практике при построении систем электропитания. Существенное ее преимущество – высокий уровень надежности, недостаток – избыточность вследствие дублирования целого ряда функциональных узлов ИВЭП. Создание ИВЭП в микроэлектронном исполнении для бортовых СВЭП в диапазоне мощностей от единиц Вт до нескольких десятков Вт привела к значительному их удорожанию (до 20 \$/Вт).

Поэтому актуальной является задача разработки надежных и дешевых бортовых систем электропитания с высоким уровнем удельных массогабаритных и энергетических характеристик.

Структура бортовой СВЭП и принципы построения ИВЭП зависят от организации бортовой сети космических аппаратов. Возможны следующие ее варианты [3]:

- бортовая сеть постоянного тока (28 В, 150 В, 200 В и др.);
- бортовая сеть переменного тока низкой частоты (400 Гц);
- бортовая сеть переменного тока высокой частоты (20–25 кГц).

В работе [4] показано, что высокочастотная бортовая сеть наиболее приемлема с точки зрения эффективности, электромагнитной совместимости и безопасности. При этом структура бортовой СВЭП принимает вид, показанный на рис. 4.

Возможны следующие подключения ИСН на МК к высокочастотной сети:

- непосредственно с понижением выходного напряжения;
- непосредственно с повышением выходного напряжения [5];
- через высокочастотный силовой трансформатор.

Кроме того, в качестве первичного преобразователя (инвертора) предлагается использовать разработанный нерегулируемый высокочастотный силовой автогенератор выходной мощностью до 700 Вт, предназначенный для общей работы с ИСН на МК [6,7]. С целью повышения выходной мощности, а также резервирования, может быть использован предложенный метод включения таких автогенераторов на параллельную работу, обеспечивающий их синхронную и синфазную коммутацию во всем диапазоне изменения тока нагрузки [8].

Предложенная структура бортовой СВЭП имеет следующие преимущества: большую эффективность, лучшие массогабаритные показатели, высший уровень надежности и радиационной стойкости, низкий уровень ЭМП, отличное качество выходных напряжений, меньшую себестоимость.

Основные технические данные многоканальных ИВЭП на основе магнитных ключей:

- | | |
|---|----------------------------|
| - диапазон изменения входного напряжения | до $\pm 30\%$; |
| - коэффициент полезного действия | 0,85-0,92; |
| - уровни выходных напряжений | 5-200 В; |
| - пульсации выходных напряжений | 10...50 мВ; |
| - общая нестабильность | $< 1\%$; |
| - уровни токов нагрузки | до 100 А и более; |
| - диапазон изменения токов нагрузки | 100%; |
| - возможны режимы стабилизации тока; | |
| - удельная мощность | 100-250 Вт/дм ³ |
| - суммарная мощность многоканального ИВЭП | 50-700 Вт; |
| - число выходных каналов | 2-10 и более; |
| - выходная мощность одного канала | 25-500 Вт; |
| - рабочая частота | 50-100 кГц; |
| - температурный диапазон при естественном охлаждении | -40-+60 С; |
| - электромагнитная совместимость и электробезопасность соответствуют основным требованиям международных стандартов; | |
| - широкие возможности для конструктивных вариаций; | |
| - параллельная работа каналов и отдельных источников; | |
| - дистанционное управление по оптическим каналам связи. | |

1. Harada K., Nabeshima T.. Applications of magnetic amplifiers to high-frequency dc-to-dc converters//*Proc. of the IEEE*, 1988, vol. 76, N. 4, p. 355–361.
2. Yaskiv V. I., Nakonechnyi I. D. Switch Power Supply on Space Explorations//*Proc. of IY Ukrainian-Russian-Chine Symposium on Space Science and Technology*. Kyiv, Ukraine, September 1996, vol.2, pp. 811–812.
3. Yaskiv V. I., Karpinski M. P., Gurnik O. P. On-Board Power System Supply of Space Vihicles//*Proc. of the Fifth China-Russian-Ukrainian Symposium on Space Science and Technology held jointly with the First International Forum on Astronautics and Aeronautics*. 6-9 June , 2000, Harbin Institute of Technology, Harbin, P.R.China, p. 207–213.
4. Simon W. E., Nored D. L. Manned spacecraft electric power systems//*Proc. of the IEEE*, 1987, vol. 75, N. 3, p. 277–307.
5. Патент №43176 А (UA). Регульований помножувач напруги / Яськів В. І., Гурник О. П. — *Опубл.в Бюл №.10*, 2001.
6. Патент №30485 А (UA). Імпульсний перетворювач постійної напруги / Яськів В. І., Гурник О. П. — *Опубл.в Бюл №.6-II*, 2000.
7. Yaskiv V. I., Shabliy O. M., Alpatov A. P., Gurnik O. P. Development of Switch Power Supplies for Radar Applications, 2001 CIE International Conference on Radar, on CD, Beijing, China, 15-18 October 2001, pp. 851–855.
8. Патент №39783 А (UA). Спосіб ввімкнення транзисторних перетворювачів постійної напруги на синхронну і синфазну роботу та пристрій для його реалізації / *Опубл.в Бюл.№5*, 2001.

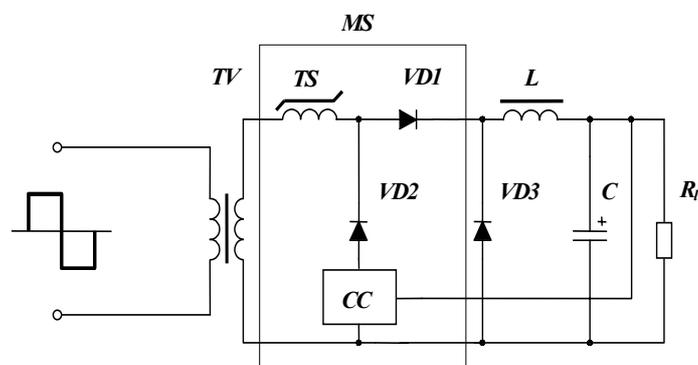


Рис. 1. Базовая схема импульсного стабилизатора напряжения на магнитных ключах

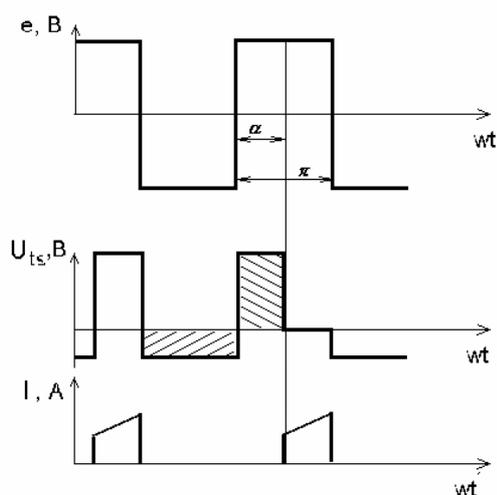


Рис. 2. Принцип работы магнитного ключа

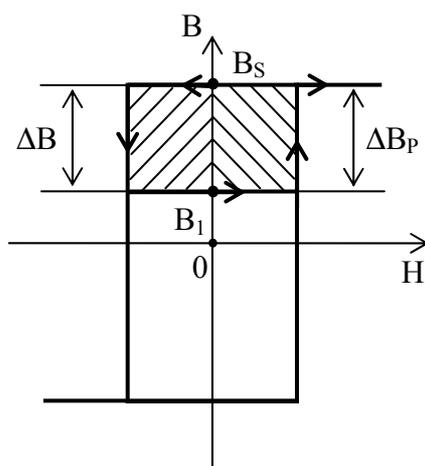


Рис. 3. Рабочий цикл магнитного ключа

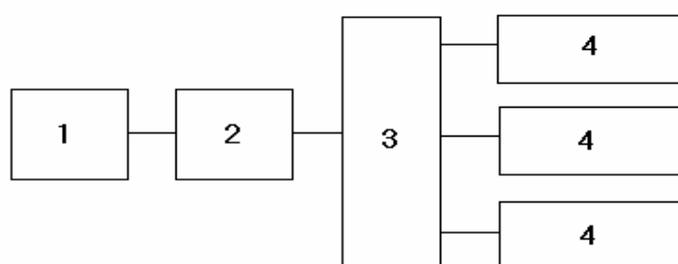


Рис. 4. Структура бортовой СВЭП.

1 – первичный источник энергии, 2 – резонансный инвертор, 3 – высокочастотная бортовая сеть, 4 - вторичные источники электропитания