

Создание высокоэффективных импульсных источников электропитания

на основе схем ФАПЧ

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты создания высокоэффективных импульсных источников электропитания, основанных на квадратичном способе накопления энергии, с использованием схем фазовой автоподстройки частоты.

Константин Менакер, к. т. н.

menkot@mail.ru

Максим Востриков

В ранее опубликованной работе [1] были приведены результаты исследований, направленных на создание высокоэффективных импульсных источников электропитания, основанных на накоплении энергии в электрическом или магнитном поле реактивных элементов в течение нескольких тактов работы ключей и последующей ее передаче на нагрузку. Указанная работа была посвящена, в том числе, и теоретическому обоснованию действия квадратичного закона накопления электрической энергии в реактивных элементах в режиме резонанса.

Режим резонанса является необходимым условием функционирования высокоэффективных источников электропитания. Достижение режима резонанса возможно различными способами. Способ, основанный на использовании полумостовой или мостовой схемы с синхронизирующими диодами, рассмотренный в [1], отличается технической простотой, однако имеет существенное ограничение по выходной мощности вследствие ограничения параметров современных электронных ключей по значению обратного напряжения. В данной работе рассматривается возможность реализации высокоэффективных источников электропитания на основе схем фазовой автоподстройки частоты, отличающихся значительной выходной мощностью и упрощенным схемотехническим способом передачи электрической энергии в нагрузку.

Рассмотрим усовершенствованную упрощенную схему накопительной части высокоэффективного источника электропитания (рис. 1).

Схема состоит из первичного источника напряжения $V1$, защитного диода $D1$, индуктивности $L1$, емкости $C1$, образующих последовательный колебательный контур; сопротивления $R1$, характеризующего активные потери в цепи; электронных ключей $J1, J2$; трансформатора тока $T1$; схемы фазовой автоподстройки частоты, совмещенной с генератором управляющих импульсов.

Принцип работы анализируемой схемы состоит в достижении режима резонанса напряжений при совпадении частот свободных колебаний контура $L1-C1$ с частотой работы электронных ключей.

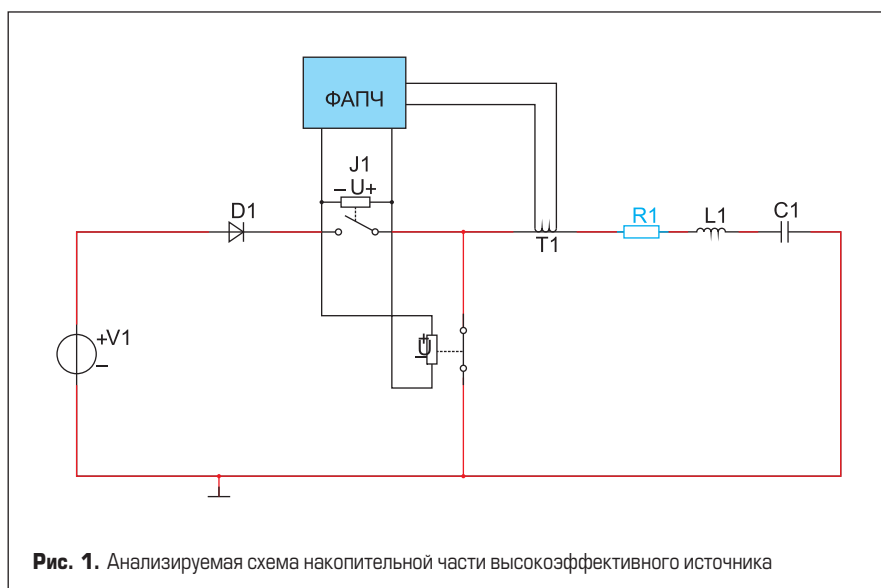


Рис. 1. Анализируемая схема накопительной части высокоэффективного источника

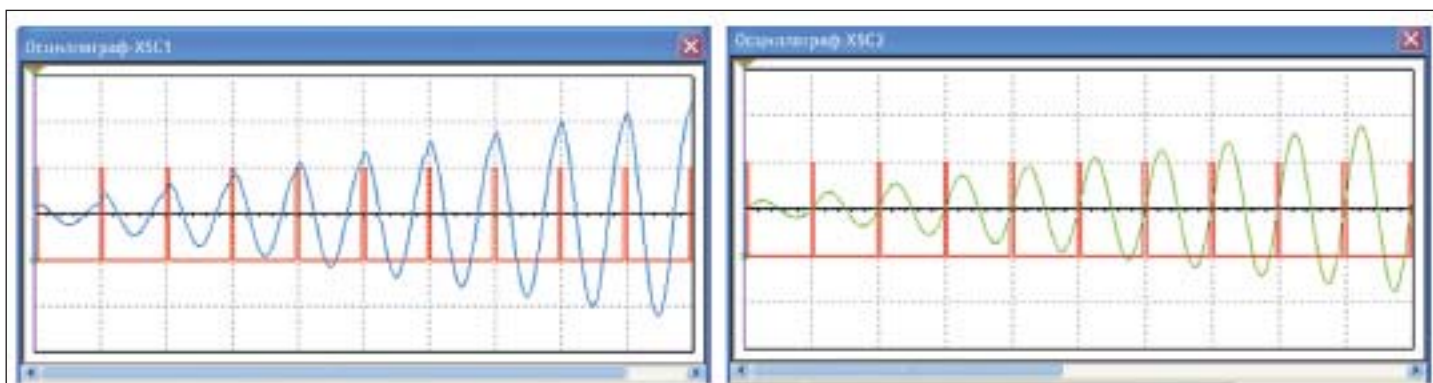


Рис. 2. Осциллограммы тока индуктивности и напряжения емкости соответственно

Кратковременное срабатывание ключа J1 происходит в момент действия амплитуды положительной полуволны тока контура L1–C1 и нулевого напряжения на реактивных элементах (рис. 2), в результате чего происходит синфазное сложение тока свободных колебаний ранее накопленной энергии с составляющей тока источника. Таким образом, достигается режим квадратичного накопления энергии, лежащий в основе работы высокоэффективных источников электропитания.

Операторным методом проанализируем переходные процессы в анализируемой схеме.

В момент первого замыкания электронного ключа J1 (ключ J2 разомкнут) ток протекает в цепи сопротивления R1, индуктивности L1 и емкости C1. Операторная схема замещения для этого режима представлена на рис. 3.

Начальные условия коммутации:

$$u_{C1}(0) = 0, i_{L1}(0) = 0. \quad (1)$$

Ток в контуре в период первой коммутации ключа J1 изменяется в соответствии с законом:

$$\begin{aligned} I_{11}(p) \times \left(R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1} \right) &= \frac{E}{p}, \\ I_{11}(p) &= \frac{\frac{E}{p}}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}} = \frac{\frac{E}{p} \times pC_1}{p^2 L_1 C_1 + pR_1 C_1 + 1} = \\ &= \frac{E / L_1}{p^2 + p \frac{R_1}{L_1} + \frac{1}{L_1 C_1}} = \frac{E / L_1}{(p - \alpha) \times (p - \beta)}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} i_{11}(t) &= \frac{E / L_1}{\alpha - \beta} \times (e^{\alpha t} - e^{\beta t}) = \frac{E}{L_1} \times \frac{e^{\alpha t} - e^{\beta t}}{\alpha - \beta} = \frac{E / L_1}{-\delta + j\omega_{св1} + \delta + j\omega_{св}} \times \\ &= \frac{E / L_1}{2j\omega_{св}} \times (e^{-\delta + j\omega_{св} t} - e^{-\delta - j\omega_{св} t}) = \frac{E / L_1}{2j\omega_{св}} \times (e^{-\delta t} \times e^{j\omega_{св} t} - e^{-\delta t} \times e^{-j\omega_{св} t}) = \\ &= \frac{E}{L_1} \times \frac{e^{-\delta t}}{2j\omega_{св}} \times (e^{j\omega_{св} t} - e^{-j\omega_{св} t}) = \frac{E}{L_1} \times \frac{e^{-\delta t}}{\omega_{св}} \times \sin(\omega_{св} t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha = -\delta + j\omega_{св}$, $\beta = -\delta - j\omega_{св}$, $\delta = R_1 / 2L_1$ — коэффициент затухания; $\omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — частота свободных колебаний в цепи; $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_1 C_1}$ — резонансная частота цепи.

Согласно уравнению (3), в момент замыкания ключа J1 в контуре образуются затухающие колебания с начальной амплитудой $E / \omega_{св} L_1$.

В период последующего размыкания ключа J1 и одновременного замыкания ключа J2 в контуре, образованном ключом J2, сопротивлением R1, индуктивностью L1 и емкостью C1, продолжают действовать

затухающие колебания. Операторная схема замещения для этого режима представлена на рис. 4.

Начальные условия коммутации:

$$u_{C1}(0) = 0, i_{L1}(0) = i_{11}(t_s), \quad (4)$$

где t_s — время замкнутого состояния ключа J1.

Ток в контуре в период коммутации ключа J2 изменяется в соответствии с законом:

$$\begin{aligned} I_{12}(p) \times \left(R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1} \right) &= L_1 i_{11}(t_s), \\ I_{12}(p) &= \frac{L_1 i_{11}(t_s)}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}} = \frac{pL_1 C_1 i_{11}(t_s)}{p^2 L_1 C_1 + pR_1 C_1 + 1} = \frac{p i_{11}(t_s)}{p^2 + p \frac{R_1}{L_1} + \frac{1}{L_1 C_1}} = \\ &= \frac{p i_{11}(t_s)}{(p - \alpha) \times (p - \beta)}, \end{aligned} \quad (5)$$

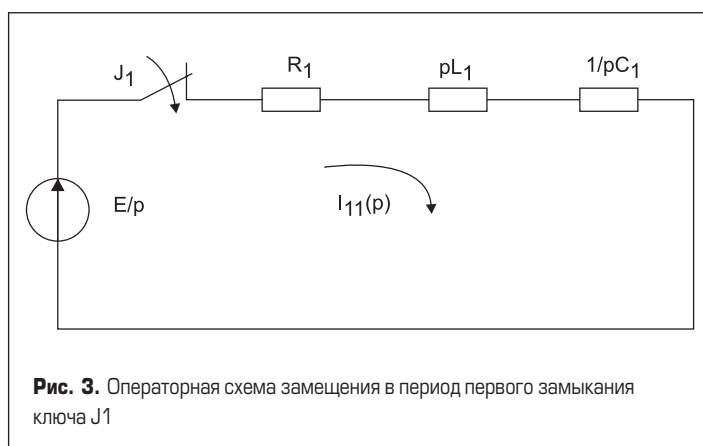


Рис. 3. Операторная схема замещения в период первого замыкания ключа J1

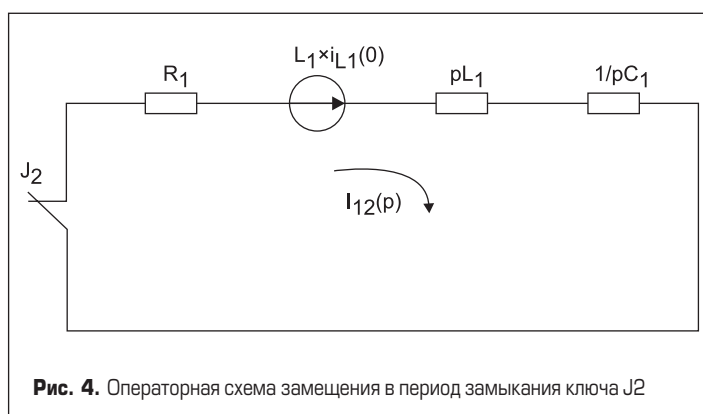


Рис. 4. Операторная схема замещения в период замыкания ключа J2

$$\begin{aligned}
 i_{12}(t) &= \frac{i_{11}(t_3)}{\alpha - \beta} \times (\alpha e^{\alpha t} - \beta e^{\beta t}) = \frac{i_{11}(t_3)}{-\delta + j\omega_{ce} + \delta + j\omega_{ce}} \times \\
 &\times [(-\delta + j\omega_{ce}) \times e^{(-\delta + j\omega_{ce})t} - (-\delta - j\omega_{ce}) \times e^{(-\delta - j\omega_{ce})t}] = \frac{i_{11}(t_3)}{2j\omega_{ce}} \times \\
 &\times (-\delta e^{-\delta t} e^{j\omega_{ce}t} + j\omega_{ce} e^{-\delta t} e^{j\omega_{ce}t} + \delta e^{-\delta t} e^{-j\omega_{ce}t} + j\omega_{ce} e^{-\delta t} e^{-j\omega_{ce}t}) = \\
 &= \frac{i_{11}(t_3)}{2j\omega_{ce}} \times (\delta e^{-\delta t} (e^{-j\omega_{ce}t} - e^{j\omega_{ce}t}) + j\omega_{ce} e^{-\delta t} (e^{-j\omega_{ce}t} + e^{j\omega_{ce}t})) = \\
 &= \frac{i_{11}(t_3)\delta e^{-\delta t}}{\omega_{ce}} \times \left(\frac{e^{-j\omega_{ce}t} - e^{j\omega_{ce}t}}{2j} \right) + i_{11}(t_3) e^{-\delta t} \left(\frac{e^{-j\omega_{ce}t} + e^{j\omega_{ce}t}}{2} \right) = \\
 &= i_{11}(t_3) e^{-\delta t} \cos(\omega_{ce}t) - \frac{i_{11}(t_3)\delta e^{-\delta t}}{\omega_{ce}} \sin(\omega_{ce}t). \quad (6)
 \end{aligned}$$

Период второго и последующих замыканий ключа J1 сопровождается синхронным сложением тока свободных колебаний колебательного контура и тока источника. Операторная схема замещения для этого режима представлена на рис. 5.

Начальные условия коммутации:

$$u_{C1}(0) = 0, i_{L1}(0) = i_{12}(t_3). \quad (7)$$

Ток в контуре в период второго и последующих тактов замыкания ключа J1 изменяется в соответствии с законом:

$$\begin{aligned}
 I_{n1}(p) \times \left(R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1} \right) &= L_1 i_{(n-1)2}(t_3) + \frac{E}{p}, \quad (8) \\
 I_{n1}(p) &= \frac{L_1 i_{(n-1)2}(t_3) + \frac{E}{p}}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}} = \frac{L_1 i_{(n-1)2}(t_3)}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}} + \frac{\frac{E}{p}}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}},
 \end{aligned}$$

где $n = 1, 2, \dots, N$ — число тактов срабатывания электронных ключей.

$$\begin{aligned}
 i_{n1}(t) &= \frac{E}{L_1} \times \frac{e^{-\delta t}}{\omega_{ce}} \times \sin(\omega_{ce}t) + i_{(n-1)2}(t_3) e^{-\delta t} \times \\
 &\times \cos(\omega_{ce}t) - \frac{i_{(n-1)2}(t_3)\delta e^{-\delta t}}{\omega_{ce}} \times \sin(\omega_{ce}t).
 \end{aligned}$$

Анализ полученных выражений показывает, что при каждом последующем замыкании ключа J1 суммарное значение тока в колебательном контуре определяется двумя составляющими: составляющей тока источника и значением тока свободных колебаний, полученного в результате накопления энергии на предыдущих тактах работы ключей.

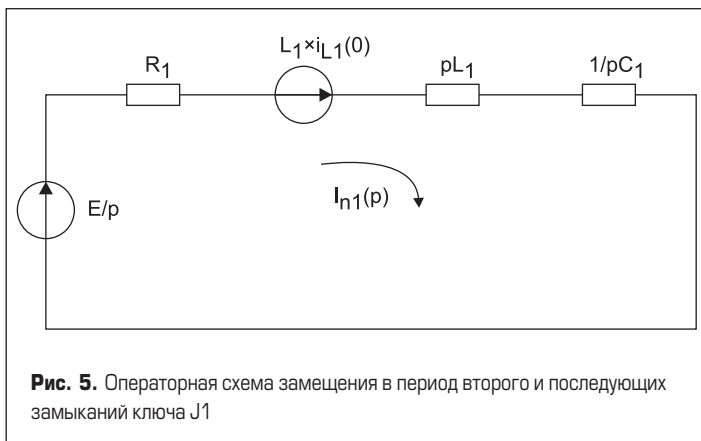


Рис. 5. Операторная схема замещения в период второго и последующих замыканий ключа J1

Для анализируемой схемы при $C_1 = 1$ мкФ, $L_1 = 1$ мГн, $R_1 = 1$ Ом, $E = 12$ В, $t_3 = 10$ мкс осциллограмма тока колебательного контура для 25 тактов работы ключей представлена на рис. 6.

Таким образом, суммарное потребленное значение энергии от источника за $n = 25$ тактов работы ключей составит:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= nE \int_0^{t_3} \frac{E}{L_1} \times \frac{e^{-\delta t}}{\omega_{ce}} \times \sin(\omega_{ce}t) dt = \frac{25 \times 12^2}{1 \times 10^{-3} \times 3,162 \times 10^4} \times \\
 &\times \int_0^{10 \times 10^{-6}} e^{-500t} \times \sin(3,162 \times 10^4 \times t) dt = 1,779 \times 10^{-4} \text{ Дж}.
 \end{aligned}$$

Накопленное же значение энергии в магнитном поле индуктивности L1 на 25-м такте работы ключей при значении действующего тока 1,414 А составит:

$$W_2 = \frac{L_1 I^2}{2} = \frac{1 \times 10^{-3} \times 1,414^2}{2} = 9,997 \times 10^{-4} \text{ Дж}.$$

Основным преимуществом высокоэффективных источников электропитания на основе схемы ФАПЧ, в отличие от ранее описанных в работе [1] полумостовых и мостовых схем с элементами синхронизации, является работа транзисторных ключей в так называемом токовом режиме. Благодаря схеме ФАПЧ срабатывание транзисторных ключей происходит в момент времени, когда напряжение на реактивных элементах колебательного контура индуктивности L1 и емкости C1 стремится к нулю. Плавное же увеличение тока в колебательном контуре в результате синхронного сложения тока свободных колебаний с токовой составляющей источника является для транзисторов штатным режимом. Современные транзисторные ключи рассчитаны на значительные рабочие токи и одновременно ограничены в работе по значению обратного напряжения. Практика применения схем ФАПЧ в составе высокоэффективных источников электропитания показала высокую надежность работы электронных ключей. Среди схем ФАПЧ автором на сегодня практически опробованы две известные схемы [2, 3].

Схемотехника построения каскадов съема накопленной энергии на нагрузку в источниках электропитания на базе схем ФАПЧ также была усовершенствована. В мостовой и полумостовой схеме [1] съем накопленной энергии производится с конденсатора колебательного контура в момент действия максимальной амплитуды напряжения (рис. 7). Недостатком данного подхода является необходимость точной синхронизации задающего генератора и генератора управляющих импульсов ключа съема. Способ, использованный в усовершенствованной схеме, основан на частичном отборе энергии с дополнительной

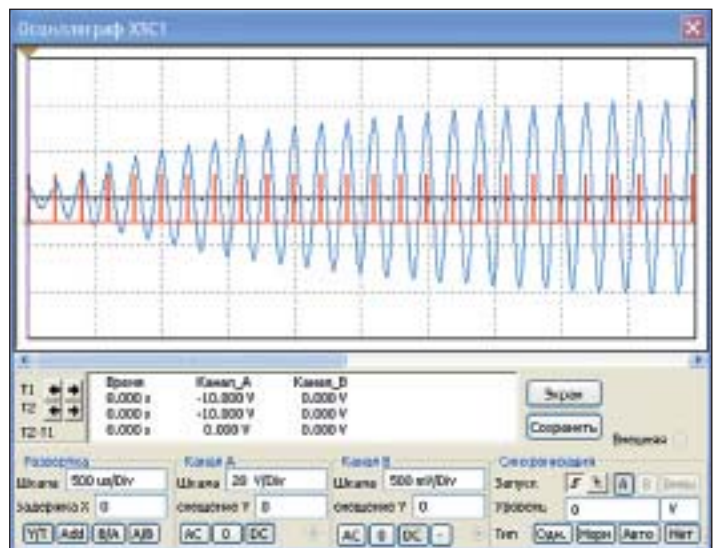


Рис. 6. Осциллограмма тока колебательного контура для 25 тактов работы ключей

съемной емкости C_2 , которая включена в состав резонансного контура (рис. 8). Номинал съемной емкости C_2 должен быть, ориентировочно, в 10 раз больше резонансной емкости C_1 . При этом эквивалентное значение последовательно соединенных емкостей C_1 и C_2

$$C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 \times 10C_1}{C_1 + 10C_1} \approx 0,9C_1 \quad (9)$$

незначительно меньше емкости C_1 и в незначительной степени изменяет резонансную частоту. Уменьшение напряжения на резонансной емкости при этом также не превышает 10%. При добротности резонансного контура свыше 10 единиц энергия, снимаемая на нагрузку, превышает потребленное от первичного источника значение.

Таким образом, высокоэффективные импульсные источники электропитания накопительного типа на основе схем ФАПЧ с усовершенствованным способом передачи энергии в нагрузку обладают существенными преимуществами по сравнению с ранее представленными схемами. Подобные источники могут быть изготовлены на большую выходную мощность при одновременном снижении стоимости изделий за счет меньшей стоимости электронных ключей, рассчитанных на меньшее обратное напряжение, и упрощения каскадов съема энергии.

Литература

1. Менакер К. В., Востриков М. В., Цветаева А. С. Создание высокоэффективных импульсных источников электропитания на основе квадратичного способа накопления энергии // Силовая электроника. 2016. № 1.
2. <http://realstrannik.com>
3. <http://globalwave.tv/forum/viewtopic.php?f=2&t=157>

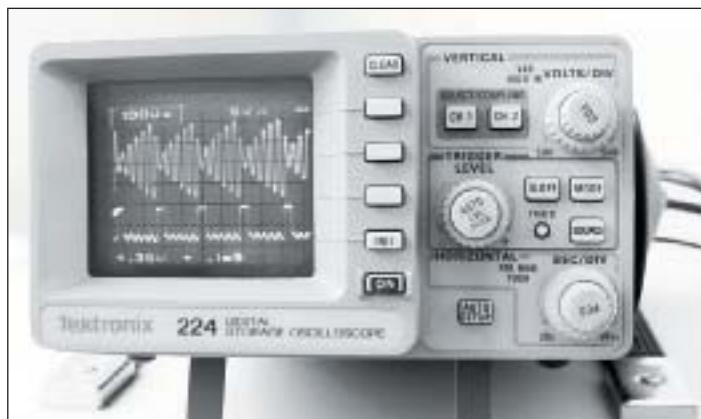


Рис. 7. Дискретный съем энергии в момент действия на конденсаторе максимальной амплитуды напряжения

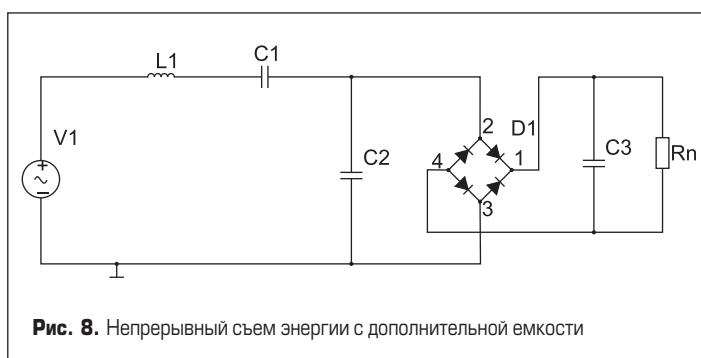


Рис. 8. Непрерывный съем энергии с дополнительной емкости