

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

к.т.н. А.М. Панченко  
(представил д.т.н., проф. Б.Т.Кононов)

Исследованы возможные режимы работы емкостного преобразователя постоянного напряжения на базе математической модели. Показано влияние основных параметров преобразователя на его характеристики и свойства.

Конструирование экономичных преобразователей постоянного напряжения мощностью свыше 500 Вт связано с рядом особенностей. Как правило, в известных решениях [1] используется преобразование постоянного напряжения в переменное или пульсирующие с последующей трансформацией, выпрямлением и фильтрацией выходного напряжения. Каждая из этих операций уменьшает коэффициент полезного действия (КПД) и ухудшает массогабаритные показатели. Кроме того, на уровнях напряжения ниже 10В КПД таких схем преобразования становится низким.

Рассмотрим преобразование постоянного напряжения за счет скачкообразного изменения емкости [2]. У преобразователя, повышающего напряжение, осуществляется заряд двух емкостей, включенных параллельно с последующим их разрядом в последовательном режиме включения на накопительную емкость и нагрузку, а в понижающем – наоборот.

На рис.1 предложен вариант схемной реализации емкостного преоб-

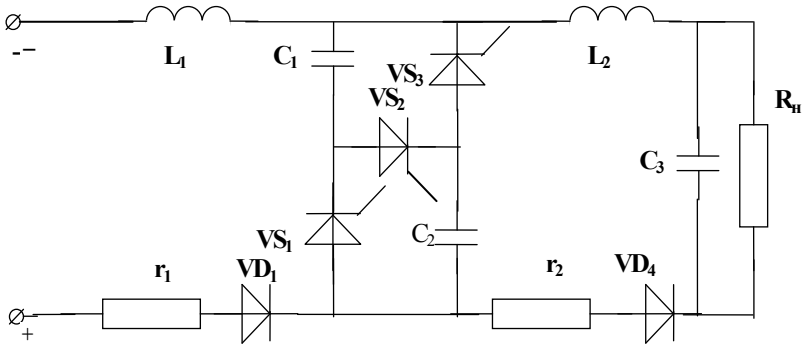


Рис.1. Емкостной преобразователь постоянного напряжения

с повышением выходного напряжения. При подаче управляющего импульса на тиристоры  $VS_1$ ,  $VS_3$  осуществляется заряд емкостей  $C_1$ ,

$C_2$ , включенных параллельно по цепи: (+) источника питания,  $r_1, VD_1, VS_1, C_1, (C_2, VS_3), L_1$ , (-) источника питания. По мере заряда емкостей тиристоры  $VS_1, VS_3$  закрываются и подается сигнал на открытие тиристора  $VS_2$ . Происходит разряд емкостей  $C_1, C_2$  в последовательном включении по цепи: положительно заряженная обкладка (+) $C_1, VS_2, (-)C_2, (+)C_2, r_2, VD_4, (C_3, R_H), L_2$ , отрицательно заряженная обкладка (-) $C_1$ . Индуктивности  $L_1, L_2$  выполняют функцию токоограничивающих элементов, а  $r_1, r_2$  представляют собой внутренние сопротивления полупроводниковых элементов (ключей). Вентили  $VD_1, VD_2$  работают в режиме ключей совместно с тиристорами.

Рассмотрим работу преобразователя. Обозначим через цикл №1 заряд емкостей  $C_1, C_2$  в режиме их параллельного включения. Разряд этих емкостей в последовательном включении на накопительный конденсатор  $C_3$  и  $R_H$  назовем циклом №2, а последующий разряд емкости  $C_3$  на нагрузку  $R_H$  – циклом №3. Последовательное выполнение трех циклов назовем тактом работы преобразователя. Составим дифференциальное уравнение для первого цикла с начальными условиями

$$U_0 - q(t) / C_1 - L_1 q'(t) - r q(t)' = 0, \quad q(t = 0) = 0; \quad q'(t = 0) = 0, \quad (1)$$

где  $q(t)$  – заряд на обкладке конденсатора  $C_1$ ;

$C_1 = 2C$  – емкость в параллельном включении;

$C_2 = 0,5 \cdot C$  – емкость в последовательном включении;

$C_3$  – накопительная емкость.

Второй цикл – разряд емкости в последовательном включении на накопительную емкость и нагрузку описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{q_2(t)}{C_2} - \frac{q_3(t)}{C_3} = L(q_{02} - q_2(t))'' + r(q_{02} - q_2(t))', \quad (2)$$

где  $q_{02} = q_0 + q_{L1}$  – начальный заряд на емкости  $C_2$ , полученный в процессе предыдущего заряда;  $q_2(t)$  – заряд на емкости  $C_2$ ;  $q_3(t)$  – заряд на емкости  $C_3$ .

Согласно закону сохранения заряда можно записать равенство

$$q_{02} = q_2(t) + q_3(t) + i_R(t)t, \quad (3)$$

где  $i_R(t)$  – ток нагрузки  $R_H$ .

Поскольку емкость  $C_3$  включена параллельно по отношению к нагрузке  $R_H$ , постольку имеет место зависимость

$$q_3(t) / C_3 = i_R(t) R_H. \quad (4)$$

Из (4) следует, что

$$i_R(t) = q_3(t) / R_H C_3. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (3), получим

$$q_{02} = q_2(t) + q_3(t) + \frac{q_3(t)t}{R_H C_3}; \quad q_3(t) = \frac{q_{02} - q_2(t)}{R_H C_3 + t} R_H C_3. \quad (6)$$

Выполняя последующие преобразования, представим (2) в виде

$$\frac{q_2(t)}{C_2} - \frac{q_{02} - q_2(t)}{R_H C_3 + t} R = -L q_2(t)'' - r q_2(t)', \quad (7)$$

где начальные условия, определены следующим образом:

$$q(t=0) = q_{02}; \quad q(t=0)' = 0.$$

Уравнение для третьего цикла работы преобразователя представлено в форме

$$U_{C3} = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_H C_3}}\right) = \frac{q_{03}}{C_3} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_H C_3}}\right), \quad (8)$$

где  $q_{03}$  – остаточный заряд, емкости  $C_3$  в момент окончания разряда на нее емкости  $C_2$ .

В следующем такте все циклы будут происходить с начальными условиями, соответствующих конечным значениям зарядов предыдущего такта. Математическое описание работы преобразователя в целом, позволяет исследовать его различные режимы работы.

В иллюстративном примере рассматривается вариант с двукратным увеличением напряжения. При этом параметры преобразователя имеют следующие значения: напряжение питания равно 50В, сопротивление нагрузки  $R_H = 50$  Ом, частота равна 1кГц. В ходе исследований проводилось изменение значений индуктивностей  $L_1, L_2$ , емкостей  $C_1 - C_2$ , накопительной емкости  $C_3$ , нагрузки  $R_H$ . Работа преобразователя оценивалась по уровню выходного напряжения, КПД, коэффициенту пульсации, отклонению напряжения. Графическое изображение полученных результатов представлено на рис.2. Средняя зона (зона 1) имеет  $L = (10^{-3} - 10^{-6})$  Гн,  $C = (10 - 1000)$  мкФ и соответствует основному режиму работы преобразователя. При этом процессы заряда и разряда происходят аperiodично. Если установившейся режим увеличить до 200 тактов работы, то значение индуктивности может быть настолько малым, что есть основание считать, что имеет место емкостное преобразование электрической энергии постоянного тока. Индуктивность лишь обеспечивает ограничение броска тока в начальный период, когда конденсаторы разряжены.

Характерным является также и то, что при изменении нагрузки обеспечивается автоматическое поддержание постоянства выходного напряжения. Чем больше нагрузка, тем больше разряжаются емкости и больше энергии поступает из сети. При холостом ходе емкости не разряжаются и поступления энергии из сети нет, уровень выходного напряжения остается неизменным. Также отмечается эффект дозировки энергии через конденсаторы в случае перегрузки или короткого замыкания в нагрузке. Потери, обусловленные активным сопротивлением ключей, составляют до 50%, но это имеет место только для начальных тактов работы. В установившемся режиме КПД составляет более 90%.

При уменьшении индуктивности ниже  $0.5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$  (зона 2) наблюдается спад напряжения (мощности), который может быть скомпенсирован увеличением частоты. В целом работа преобразователя на частотах выше  $100 \text{ кГц}$  общий вид фигуры (рис.2) существенно не меняет, только смещается в область малых значений емкостей и индуктивностей. Зона 3 обусловлена колебательным характером процессов заряда и разряда. При выборе границы значений переменных  $L_1$ ,  $L_2$  и  $C_1$ ,  $C_2$  следует исходить из того, что при емкостях ниже  $1 \text{ мкФ}$  и индуктивности  $L = 3,6 \text{ мГн}$  наблюдается неограниченный рост напряжения. При колебательном заряде преобразователя в первом цикле заряда конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  (параллельное включение) заряжаются до удвоенного значения напряжения питания, примерно равного  $2U_0$ . Момент закрытия тиристоров  $VS_1$ ,  $VS_2$  обусловлен равенством нулю тока, проходящего через него. А это произойдет в тот момент, когда  $dq / dt = 0$ , т.е. тогда, когда заряд емкости максимальный. После перекоммутации в последовательное включение ( $\approx 4U_0$ ) происходит

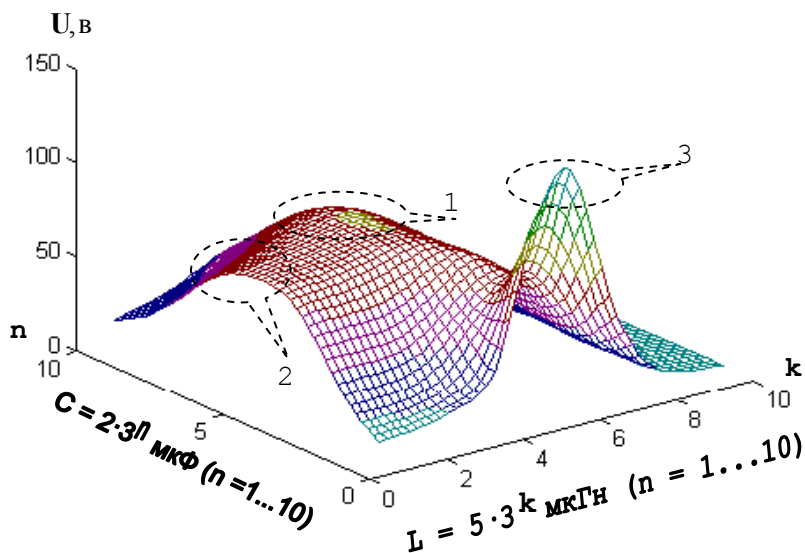


Рис.2. Зависимость выходного напряжения от значений емкости и индуктивности

колебательный разряд на емкость  $C_3$  ( $\approx 8U_0$ ). Емкость, которая разряжается колебательно, перезаряжается до обратной полярности ( $\approx -2U_0$ ).

Таким образом, за один такт напряжение может быть увеличено в восемь раз. Конечно, в первом такте этого не происходит, поскольку емкость  $C_3$  относительно большая и поступившей порции энергии для ее заряда недостаточно. Входная емкость после первого такта имеет удвоенное зна-

чение напряжения питания с противоположной полярностью. При заряде емкости с противоположной полярностью ( $\approx -2U_0$ ) в колебательном режиме в первом цикле второго такта напряжение на емкостях примерно равно ( $\approx 6U_0$ ). Далее за счет удвоения напряжения при переключении с параллельного соединения на последовательное и удвоение за счет колебательного заряда напряжение на емкостях примерно равно  $24U_0$ . Имеет место лавинообразное возрастание напряжения на выходе преобразователя.

В зоне 3 при определенном сочетании значений индуктивности и емкости, преобразователь может переходить в колебательный режим с хаотически изменяющимся выходным напряжением, которое может и не иметь установившегося значения.

Таким образом, рассмотренному преобразователю свойственны два режима работы:

- режим “трансформатора постоянного тока”, когда сохраняется кратность увеличения напряжения и имеет место стабильная работа преобразователя. Силовым преобразующим элементом является емкость. Индуктивность может быть сколь угодно мала, по крайней мере, для установившегося режима.

- режим умножителя напряжения с “неограниченным” возрастанием напряжения и мощности. В качестве преобразующего элемента используется как емкость, так и индуктивность.

Изменение таких параметров как соотношение длительности заряда разряда емкостей, частоты, нагрузки, кратности уменьшения или увеличения напряжения позволяют, в зависимости от конкретно поставленной задачи получить требуемые значения - коэффициента пульсации, КПД, отклонения напряжения при изменяющейся нагрузке, а также обеспечить требуемые массогабаритные показатели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М: Энергоатомиздат, 1992. – 252 с.

2. Бестрансформаторное устройство форсированного заряда аккумуляторных батарей асимметричным током / Панченко А., Гордиенко В. // Пат. № 2040844, Россия, 1995. – БИ № 21.

*Поступила в редколлегию 6.03.2001*