

Многоступенчатый резонансный заряд конденсатора

В статье предложена схема многоступенчатого заряда конденсатора до напряжений, в несколько раз превышающих двойное напряжение источника питания. Схема состоит из зарядного и перезарядного контуров, причем в цепи перезарядного контура последовательно с индуктивностью могут быть включены транзистор для получения положительного выходного напряжения на конденсаторе, диод для получения отрицательного напряжения или резистор для получения на конденсаторе пилообразного напряжения.

Сергей Доля

sndolya@jinr.ru

Виктор Смирнов

Введение

Для питания импульсных нагрузок существует несколько способов заряда емкостных накопителей энергии. Наиболее экономичный способ — заряд конденсатора от источника постоянного тока через индуктивность, который подробно описан в работе [1].

Процесс заряда конденсатора от источника напряжения U описывается уравнением:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{Q}{C}, \quad (1)$$

где L — индуктивность нагрузки; R — ее сопротивление; i — ток заряда; Q — заряд на емкости; C — емкость нагрузки; di/dt — изменение тока заряда во времени.

Решением уравнения (1) будет затухающая синусоидальная функция:

$$i(t) = \left(\frac{U - U_c(0)}{\omega L} \right) e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (2)$$

где $U_c(0)$ — величина напряжения в начальный момент времени; $\omega = 2\pi/(LC)^{1/2}$ — круговая частота зарядного контура; α — декремент затухания колебаний в контуре.

Напряжение на нагрузке в момент времени $t = T/2$ — через полпериода после начала процесса зарядки — достигает значения:

$$U_{\max} = U \left(1 + e^{-\frac{\alpha T}{2}} \right). \quad (3)$$

В случае отсутствия затухания при $\alpha = 0$ и при начальном значении $U_c(0) = 0$ напряжение на кон-

денсаторе достигает двойной величины напряжения источника питания.

Различные схемы зарядки конденсатора

Для заряда конденсатора от низковольтного источника питания до высоких напряжений применяются трансформаторные зарядные устройства [2].

Многokратного увеличения напряжения по сравнению с двойным напряжением источника питания на заряжаемом конденсаторе можно достигнуть, если осуществить многоступенчатый заряд/перезаряд конденсатора, вводя в схему второй индуктивный накопитель энергии, в котором она запасается во время заряда конденсатора от источника питания и передается в конденсатор после окончания его заряда от источника питания путем перезаряда его через этот индуктивный накопитель.

В этом случае за первый цикл напряжение на конденсаторе по абсолютной величине превысит напряжение источника питания более чем в 2 раза (теоретически в 2,5 раза), но будет противоположного знака. За несколько таких циклов напряжение на заряжаемом конденсаторе может в десятки раз превысить напряжение источника питания. Величина конечного напряжения на конденсаторе ограничивается величиной активного сопротивления в цепи перезаряда конденсатора и допустимыми напряжениями на элементах схемы.

Процесс многоступенчатого заряда конденсатора подробно рассмотрен в описании к патенту [3]. Схема подобного зарядного устройства приведена на рис. 1.

Процессы заряда и перезаряда описываются уравнениями:

$$U_{Cf} = L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + U_C, \quad (4)$$

$$dU_C = i_3 \frac{dt}{C}, \quad (5)$$

$$U_C = L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2, \quad (6)$$

$$i_1 = i_2 + i_3, \quad (7)$$

$$U = L_3 \frac{di_5}{dt} + R_3 i_5 + U_{Cf}, \quad (8)$$

$$i_5 = i_1 + i_4, \quad (9)$$

$$dU_{Cf} = i_4 \frac{dt}{C_f}; \quad (10)$$

перезаряд:

$$U_C = L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2, \quad (11)$$

$$U = L_3 \frac{di_5}{dt} + R_3 i_5 + U_{Cf}, \quad (12)$$

$$i_4 = i_5, \quad (13)$$

$$dU_{Cf} = i_4 \frac{dt}{C_f}. \quad (14)$$

Работа схемы поясняется эпюрами напряжений и токов, приведенными на рис. 2.

Где: U_1 — напряжение управления транзистором VT₁; U_2 — напряжение управления транзистором VT₂; i_1 — ток от источника питания; i_2 — ток через перезарядную индуктивность L_2 ; U_C — напряжение на конденсаторе C .

Первоначально напряжение на конденсаторе относительно «земли» равно нулю. Амплитуда зарядного тока первого цикла заряда/перезаряда определяется только напряжением источника питания. В момент времени $t = 0$ (рис. 2) открываются транзисторы VT₁, VT₂, происходит первоначальный заряд конденсатора квазисинусоидальным импульсом тока по цепи $L_1 C$.

Ток протекает через перезарядную индуктивность L_2 и ограничивающий транзистор VT₂, но он намного ниже зарядного тока через конденсатор C , так как для обеспечения колебательного процесса во время заряда конденсатора от источника питания величина перезарядной индуктивности L_2 должна быть в шесть и более раз больше индуктивности L_1 .

С момента времени, когда i_1 становится меньше i_2 , начинается перезарядка положительно заряженного конденсатора через перезарядную индуктивность, причем в момент закрытия транзистора VT₁ (t_1) напряжение на конденсаторе снижается незначительно (от максимального). Перезарядка заканчивается, когда ток перезарядки снизится

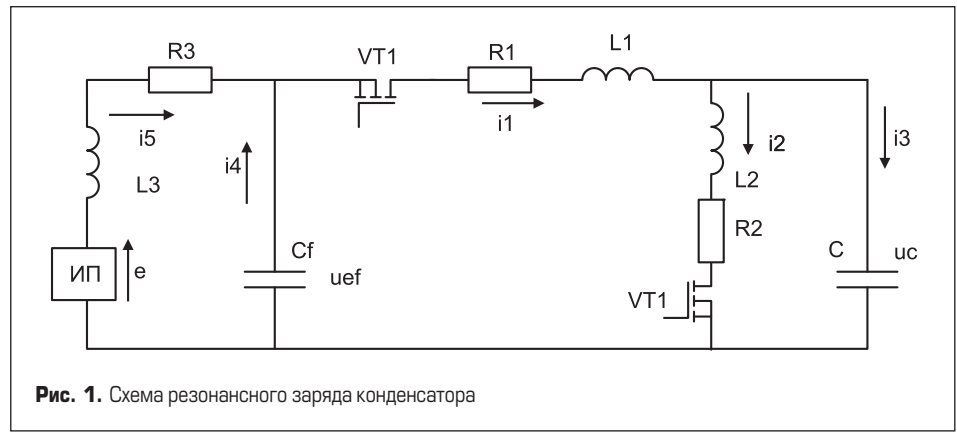


Рис. 1. Схема резонансного заряда конденсатора

до нуля (t_2), причем к этому моменту напряжение на конденсаторе будет отрицательным и в идеальном случае, согласно расчетам, в 2,5 раза превысит напряжение источника питания, так как в конденсатор добавляется и энергия, запасенная в индуктивности L_2 во время заряда конденсатора от источника питания.

В последующие циклы амплитуды зарядного тока будут расти в соответствии с

$$I_{m} = \frac{(U - U_C(0))}{\omega L_1}, \quad (15)$$

то есть определяться напряжением источника питания и начальным напряжением на конденсаторе данного цикла. При этом по сравнению с предыдущим циклом увеличивается энергия, вводимая в конденсатор от источника питания, и напряжение на нем. Увеличивается и энергия, вводимая в накопительную индуктивность во время заряда конденсатора, хотя ток в ней начинает течь от источника пита-

ния только при положительном напряжении на конденсаторе. Форма напряжения на конденсаторе пилообразная с крутым передним фронтом и более пологим задним фронтом.

В таблице приведены расчеты восьми циклов зарядов/перезарядов для схемы рис. 1 с параметрами: $L_1 = 4$ мГн, $R_1 = 0,1$ Ом, $L_2 = 25$ мГн, $R_2 = 0,3$ Ом, $C_1 = 10$ мкФ, $L_3 = 20$ мГн, $R_3 = 0,1$ Ом, $C_2 = 1$ мФ. Расчеты показывают, что после первого цикла заряда/перезаряда напряжение на конденсаторе превысит напряжение источника питания в -2,49 раза (+1,61), после второго цикла напряжение на конденсаторе превысит напряжение источника питания в -4,99 раза (+4,27), после третьего цикла в -7,73 раза (+6,78), а после восьмого цикла напряжение превысит в -25,12 раза (+23,1). В скобках указаны положительные напряжения на конденсаторе в момент окончания заряда.

В идеальном случае при $R_1 = R_2 = R_3 = 0$ после восьми циклов заряда/перезаряда соотношения положительного и отрицательного

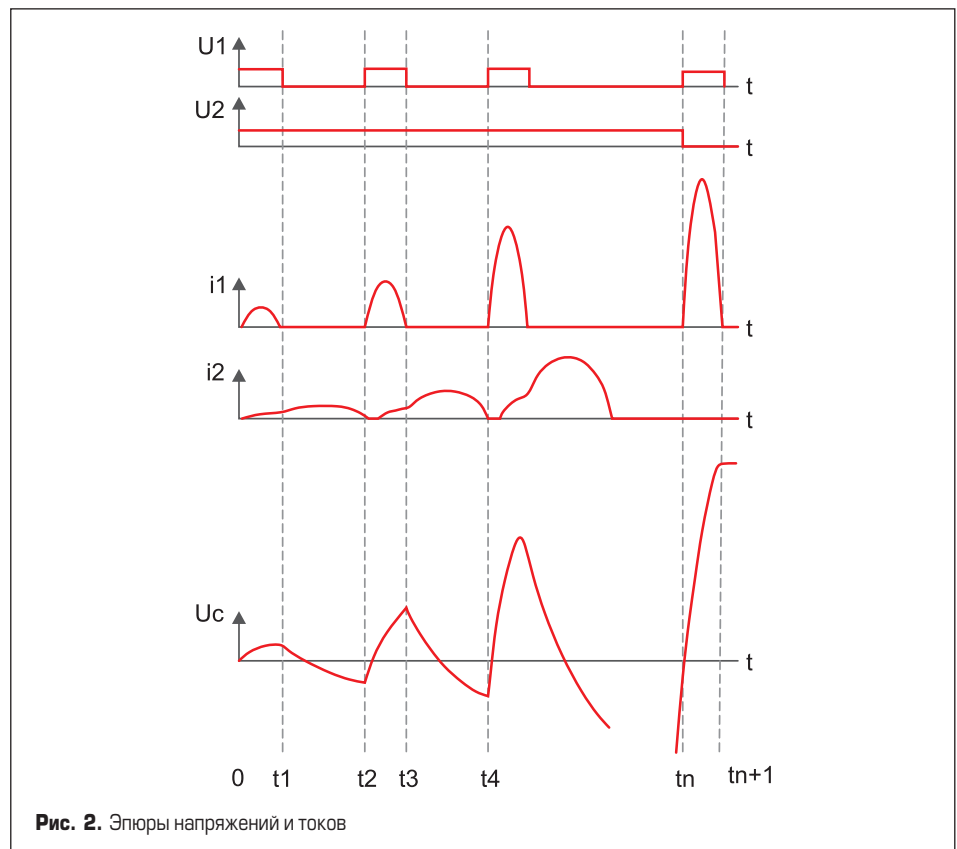


Рис. 2. Эпюры напряжений и токов

Таблица. Многоступенчатый заряд конденсатора от источника питания 100 В

Параметры	Номер цикла							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Напряжение на конденсаторе перед зарядом, В	0	-249	-499	-773	-1071	-1371	-1720	-2102
Максимальное напряжение в процессе заряда, В	200	451	707	985	1286	1613	1969	2356
Напряжение на конденсаторе в конце заряда, В	164	436	689	961	1258	1577	1931	2310
Энергия на конденсаторе после заряда, Дж	0,134	0,950	2,374	4,618	7,913	12,435	18,644	26,681
Напряжение на конденсаторе после перезаряда, В	-249	-499	-773	-1071	-1371	-1720	-2102	-2512
Прирост напряжения за цикл, В	-249	-250	-274	-298	-300	-349	-382	-410
Энергия на конденсаторе после перезаряда, Дж	0,310	1,245	2,988	5,735	9,398	14,792	22,092	31,551
Амплитуда зарядного тока, А								34,860
Максимальный ток источника питания, А								9,620
Минимальный ток источника питания, А								5,200

напряжений на конденсаторе по сравнению с напряжением источника питания составят: -26,12/+23,24.

Длительность заряда 2,12 мс, длительность перезаряда — 4,24 мс, полная длительность одного цикла — 6,36 мс.

Как видно из таблицы, во время каждого последующего цикла в конденсатор от источника питания вводится большее количество энергии, а напряжение увеличивается на большую величину. Рост напряжения прекратится, когда активные потери в элементах схемы сравняются с энергией, поступающей от источника питания в процессе заряда конденсатора. Однако максимальное напряжение на элементах схемы не должно превышать допустимых для них значений.

Ввиду импульсного характера зарядного тока целесообразно иметь LC-фильтр на вы-

ходе источника питания, благодаря которому резко снижается мощность источника питания. Во время восьмого цикла амплитуда зарядного тока составила 34,9 А при длительности импульса 2,12 мс. Применение фильтра ограничило амплитуду тока источника питания до 9,6 А.

При управлении транзистором VT₂ окончательное напряжение может быть как положительным, так и отрицательным. Как видно из таблицы, при малых активных потерях отрицательное напряжение по абсолютной величине больше положительного, поэтому при необходимости иметь на конденсаторе большее напряжение цикл заряд/перезаряд должен заканчиваться стадией перезарядки. В этом случае для упрощения схемы целесообразно транзистор VT₂ заменить диодом VD.

Поскольку напряжение на конденсаторе имеет биполярную пилообразную форму, то при необходимости можно модернизировать схему в формирователь пилообразного напряжения на конденсаторе. Чтобы соблюдалось равенство амплитуд напряжения от цикла к циклу, необходимо, чтобы энергия, вводимая от источника питания во время заряда, была равна энергии, рассеиваемой во время перезаряда. Для этого в предлагаемой выше схеме транзистор VT₂ необходимо заменить резистором соответствующей величины (рис. 3).

Таким образом на конденсаторе будет формироваться биполярное пилообразное напряжение с постоянными положительными и отрицательными амплитудами. Наклоны растущего и спадающего напряжений определяются параметрами схемы. Отношение положительных и отрицательных амплитуд напряжений на конденсаторе и их величина зависят от величины активного сопротивления в цепи перезаряда. При малых значениях R отрицательное напряжение превысит положительное и увеличится кратность амплитуды пилообразного напряжения по отношению к напряжению источника питания, при больших значениях R будет большей положительная амплитуда напряжения и меньшая кратность напряжения на конденсаторе по отношению к напряжению источника питания.

Расчеты показывают, что при индуктивности L₁ = 0,14 мГн, перезарядной индуктивности L₂ = 2 мГн, конденсаторе C = 0,6 мкФ, резисторе R = 10 Ом и напряжении источника питания 100 В амплитуды напряжения в конденсаторе 4: U = +2607 В и U = -2500 В, время заряда конденсатора составляет 9,4 мкс, время перезаряда 31,4 мкс. Форма напряжения на конденсаторе приведена на рис. 4.

Заключение

Предложена схема заряда конденсатора до напряжений, в несколько раз превышающих двойное напряжение источника питания. Это достигается путем многократного заряда конденсатора от источника питания через индуктивность и последующего за ним перезаряда через индуктивность и транзистор, подключенные к заряжаемому конденсатору.

Предложенная схема после замены транзистора резистором может применяться как формирователь пилообразного напряжения на конденсаторе.

Литература

1. Опре В. М. Индуктивный заряд емкостных накопителей // Силовая электроника. 2008. № 4.
2. Вашкевич Е., Болотовский Ю., Таназлы Г., Никитин А. Разработка систем заряда емкостных накопителей // Силовая электроника. 2008. № 4.
3. Доля С. Н., Смирнов В. И. Патент РФ № 2734903. Устройство для резонансного заряда конденсатора. Опубликовано 26.10.2020, бюллетень № 30.

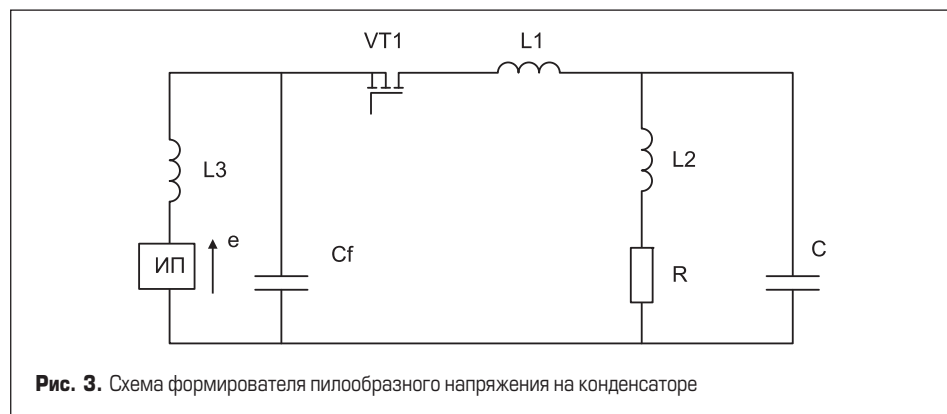


Рис. 3. Схема формирователя пилообразного напряжения на конденсаторе

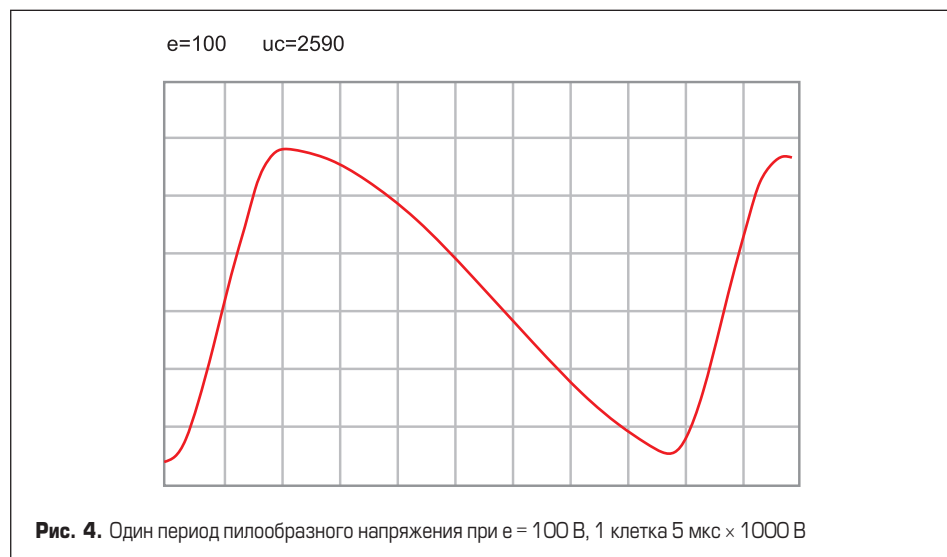


Рис. 4. Один период пилообразного напряжения при e = 100 В, 1 клетка 5 мкс × 1000 В