

## Прямоугольный выходной импульс в ёмкостном накопителе

*В.М. Алексеенко\*, С.С. Кондратьев*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*alexeeenko@oit.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** Структура ёмкостного накопителя ЛТД ступени позволяет получать прямоугольный выходной импульс за счет формирования двух разрядных контуров. Для достижения необходимой формы выходного импульса соотношение количества стандартных (основных) секций к модифицированным (с другой ёмкостью конденсаторов) должно составлять 3:1. При соотношении количества стандартных секций и модифицированных 1:1 вершина выходного импульса имеет значительные искажения. С целью упрощения конструкции и уменьшения искажения вершины выходного импульса предложено коммутировать одну стандартную секцию и одну модифицированную одним разрядником. Проведено численное моделирование такой схемы накопителя при разных соотношениях индуктивности разрядника и индуктивностей в секциях. Показана возможность получения прямоугольного импульса во всех исследованных соотношениях индуктивностей и получено оптимальное значение ёмкости конденсаторов в модифицированной секции для достижения максимального значения коэффициента прямоугольности выходного импульса. В данной работе максимальное значение длительности вершины на уровне 0.9 составило 38% от длительности импульса на уровне 0.1, при этом искажение вершины не превышает 5%.

**Ключевые слова:** мощные импульсные генераторы, ёмкостной накопитель, прямоугольный импульс.

### 1. Введение

Ёмкостной накопитель является наиболее используемым накопителем энергии в мощных импульсных генераторах. Разрядный контур такого накопителя представляет собой последовательный колебательный контур, для которого выходной импульс на активной нагрузке имеет форму синусоиды. Однако в некоторых задачах, таких как рентгенография, получение СВЧ импульсов и прочее, накачка лазера оптимальной формой импульса является прямоугольная с минимальной длительностью фронта и плоской вершиной. Типовым решением для получения такой формы импульса является использование формирующей линии [1–3]. Данное решение давно и широко используется в мощной импульсной технике. Основным недостатком данной схемы является добавление в структуру генератора импульсной формирующей линии, длина которой зависит от длительности импульса. Новым методом получения прямоугольного импульса является сложение токов с различной частотой, являющихся членами ряда Фурье при представлении прямоугольного импульса. В работах [4–6] показана возможность получения прямоугольного импульса непосредственно на выходе ЛТД ступени. Для этого используется особенность структуры накопителя ЛТД ступени, представляющего собой параллельное соединение большого числа единичных секций. Каждая единичная секция (далее секция) состоит из двух накопительных конденсаторов и разрядника. Для формирования второго колебательного контура с большей частотой колебаний у части секций ЛТД ступени уменьшена ёмкость накопительных конденсаторов. Секции со стандартной ёмкостью накопительных конденсаторов называются стандартными, с уменьшенной ёмкостью – модифицированными.

В работе [4] получено, что оптимальное соотношение количества стандартных секций к модифицированным должно составлять 3:1. Таким образом, минимальной ячейкой накопителя для получения прямоугольного импульса является сборка из 4 секций. Однако в работе [4] показана возможность формирования прямоугольного импульса при соотношении секций 1:1. Недостатком такого соотношения секция является сильное искажение вершины выходного импульса. Для нейтрализации данного недостатка и упрощения схемы накопителя

предложено использовать не индивидуальные разрядники в каждой секции, а одну стандартную секцию и одну модифицированную коммутировать одним разрядником. Во-первых, уменьшится количество разрядников в накопителе. Во-вторых, вынос разрядника из секций в общий контур позволит сгладить искажения вершины выходного импульса за счет увеличения выходной индуктивности накопителя.

В данной работе в численном моделировании исследована возможность формирования прямоугольного импульса при коммутировании общим разрядником одной стандартной секции и одной модифицированной.

## 2. Схема ёмкостного накопителя

При анализе работы накопителя ЛТД ступени схемозамещение стандартной секции представляет собой последовательный колебательный контур. В этом контуре ёмкость равна суммарной ёмкости двух последовательно включенных конденсаторов (общая ёмкость 4 нФ, зарядное напряжение 200 кВ), индуктивность равна суммарной индуктивности накопительных конденсаторов, разрядника и соединительных шин (320 нГн), активное сопротивление равно суммарному сопротивлению конденсаторов (0.6 Ом). Модифицированные секции отличаются только ёмкостью конденсаторов (общая ёмкость 0.425 нФ, зарядное напряжение 200 кВ), остальные параметры идентичны стандартной секции. Сопротивление нагрузки выбрано равным импедансу стандартной секции.

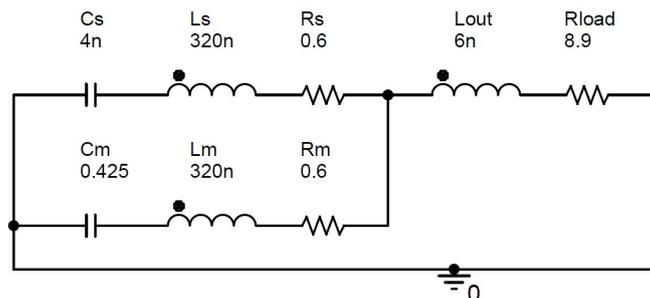


Рис. 1. Схемозамещение накопителя с индивидуальными разрядниками в стандартной секции (элементы  $C_s$ ,  $L_s$ ,  $R_s$ ) и в модифицированной (элементы  $C_m$ ,  $L_m$ ,  $R_m$ ).  $L_{out}$  – выходная индуктивность накопителя,  $R_{load}$  – активная нагрузка.

Оценка близости формы импульса к прямоугольной производится с помощью коэффициента прямоугольности, в котором рассчитывается отношение длительности импульса на уровне 95% от амплитудного значения к длительности импульса на уровне 10% от амплитудного. Идеальный прямоугольник имеет максимальный коэффициент прямоугольности равный 1. Для схемозамещения на Рис. 1 коэффициент прямоугольности равен 0.58, тогда как для выходного импульса одной стандартной секции коэффициент прямоугольности равен 0.18.

При коммутировании стандартной и модифицированной секций одним разрядником в схемозамещении индуктивность разрядника выносится из  $L_s$  и  $L_m$  и добавляется в выходную индуктивность  $L_{out}$ . Итоговое схемозамещение приведено на Рис. 2.

Данная схема моделировалась в *Pspice* при трех значениях выходной индуктивности ( $L_{out} = 150, 200$  и  $250$  нФ) и пяти значениях суммарной индуктивности модифицированной секции ( $L_m = 80, 100, 120, 140$  и  $160$  нГн). Это позволило изучить работу накопителя с общим разрядником при различных соотношениях индуктивностей  $L_s$ ,  $L_m$  и  $L_{out}$ . На каждом сочетании значений индуктивностей рассчитывался выходной импульс накопителя при  $C_m$  меняющегося в пределах от 200 до 1000 пФ с шагом 10 пФ.

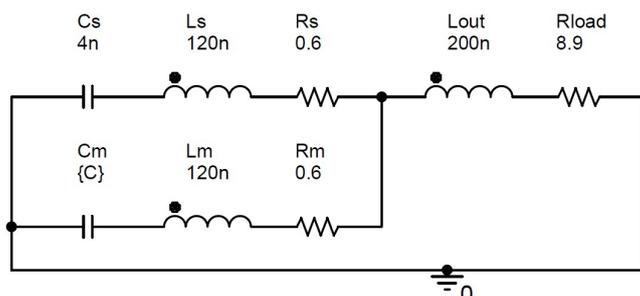


Рис. 2. Схемозамещение накопителя со стандартной секцией (элементы  $C_s$ ,  $L_s$ ,  $R_s$ ) и модифицированной (элементы  $C_m$ ,  $L_m$ ,  $R_m$ ) и общим разрядником.  $L_{out}$  – индуктивность общего разрядника,  $R_{load}$  – активная нагрузка.

### 3. Результаты моделирования

На Рис. 3 приведена зависимость коэффициента прямоугольности выходного импульса накопителя с общим разрядником (схема на Рис. 2) в зависимости от величины  $C_m$ . Видно, что диаграмма имеет выраженный оптимум с наибольшим значением коэффициента прямоугольности.

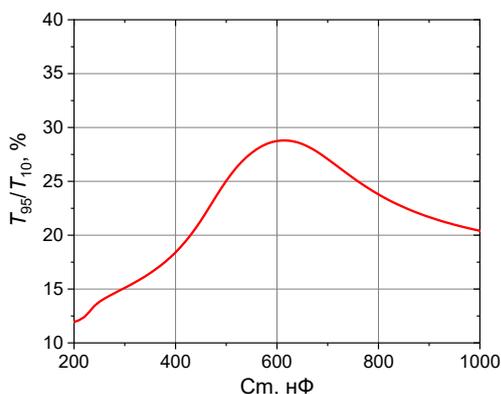


Рис. 3. Зависимость коэффициента прямоугольности выходного импульса накопителя с общим разрядником от ёмкости конденсатора в модифицированной секции.  $L_m = 120$  нГн,  $L_{out} = 200$  нГн.

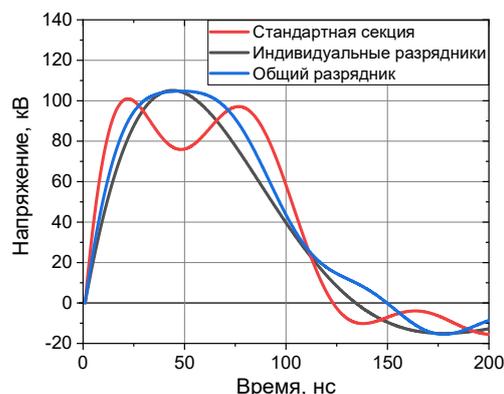


Рис. 4. Выходной импульс одной стандартной секции (черным), накопителя с индивидуальными разрядниками (красным) и накопителя с общим разрядником (синим).

Осциллограмма выходного импульса в точке оптимума приведена на Рис. 4. Также на Рис. 4 приведены выходной импульс одной стандартной секции и выходной импульс накопителя с индивидуальными разрядниками в секциях. Видно, что накопитель с индивидуальными разрядниками имеет малую длительность фронта и большую длительностью вершины импульса (коэффициент прямоугольности 0.58), однако из-за искажения вершины не имеет практической ценности. Выходной импульс накопителя с общим разрядником имеет в два раза меньше коэффициент прямоугольности (0.29), однако вершина импульса при этом не имеет искажений.

Еще одним фактором, имеющим значительное влияние на форму импульса, является соотношение индуктивностей секций. В данной работе изменялась только величина суммарной индуктивности модифицированной секции в диапазоне от 80 до 160 нГн с шагом 20 нГн при неизменном значении суммарной индуктивности стандартной секции 120 нГн. Диаграммы зависимости коэффициента прямоугольности от величины ёмкости  $C_m$  при различных значениях  $L_m$  приведены на Рис. 5. Из диаграмм видно, что с уменьшением индуктивности  $L_m$  увеличивается максимальное значение коэффициента прямоугольности, при этом также увеличивается оптимальное значение ёмкости  $C_m$ .

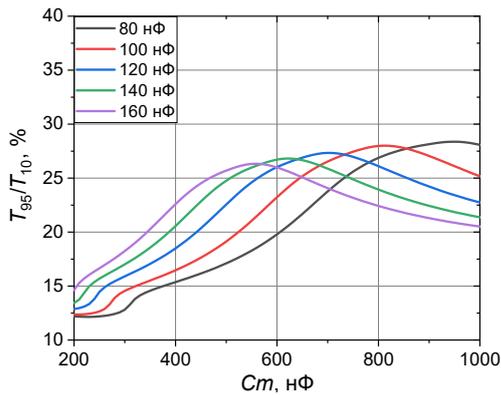


Рис. 5. Зависимости коэффициента прямоугольности выходного импульса накопителя с общим разрядником от ёмкости конденсатора модифицированной секции при различных значениях  $L_m$ .  $L_{out} = 200$  нГн.

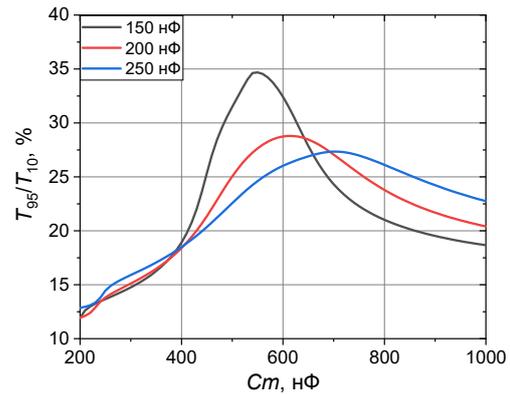


Рис. 6. Зависимости коэффициента прямоугольности выходного импульса накопителя с общим разрядником от ёмкости конденсатора модифицированной секции при различных значениях  $L_{out}$ .  $L_m = 120$  нГн.

Также на форму импульса влияет соотношение выходной индуктивности накопителя (в основном состоящей из индуктивности разрядника) с индуктивностями секций. В данной работе рассматривались три значения  $L_{out}$ : 150, 200 и 250 нГн. Диаграммы зависимости коэффициента прямоугольности от величины ёмкости  $C_m$  для  $L_m = 120$  нГн и трех значений  $L_{out}$  приведены на Рис. 6. Из диаграмм видно, что с уменьшением величины индуктивности  $L_{out}$  увеличивается максимальное значение коэффициента прямоугольности, при этом пик становится более выраженным.

**Таблица 1.** Параметры контура на Рис. 2 при максимально возможном значении коэффициента прямоугольности для различных сочетаний значений  $L_{out}$  и  $L_m$ .  $L_{out}$  – индуктивность разрядника,  $L_m$  – индуктивность модифицированной секции,  $C_m$  – ёмкость модифицированной секции,  $T_{95}/T_{10}$  – коэффициент прямоугольности,  $f_m/f_s$  – отношение резонансных частот модифицированной секции к стандартной,  $\rho_m/\rho_s$  – отношение импедансов модифицированной секции к стандартной.

№	$L_{out}$ , нГн	$L_m$ , нГн	$C_m$ , пФ	$T_{95}/T_{10}$	$f_m/f_s$	$\rho_m/\rho_s$
1	150	80	730	0.38	2.87	1.91
2	150	100	630	0.36	2.76	2.30
3	150	120	550	0.35	2.70	2.70
4	150	140	490	0.33	2.64	3.08
5	150	160	440	0.32	2.61	3.48
6	200	80	820	0.31	2.70	1.80
7	200	100	700	0.30	2.62	2.18
8	200	120	610	0.29	2.56	2.56
9	200	140	540	0.28	2.52	2.94
10	200	160	490	0.27	2.47	3.30
11	250	80	950	0.28	2.51	1.67
12	250	100	810	0.28	2.43	2.03
13	250	120	700	0.27	2.39	2.39
14	250	140	620	0.27	2.35	2.74
15	250	160	560	0.26	2.31	3.08

#### 4. Обсуждение

Обобщенные данные для максимальных значений коэффициента прямоугольности при каждом сочетании значений  $L_{out}$  и  $L_m$  приведены в Таблице 1. Из таблицы видно, что коэффициент прямоугольности примерно одинаково зависит как от величины индуктивности  $L_m$ , так и от величины индуктивности  $L_{out}$ . При этом с увеличением  $L_m$  уменьшается оптимальное значение  $C_m$  (при котором коэффициент прямоугольности имеет максимальное

значение), тогда как с увеличением  $L_{out}$  происходит увеличение оптимального значения  $C_m$ . Если рассматривать стандартные и модифицированные секции как отдельные последовательные колебательные контуры, то согласно [4] теоретически резонансные частоты этих контуров должны отличаться в три раза. Из таблицы видно, что чем ближе это соотношение к трем, то тем больше коэффициент прямоугольности. Тогда как влияние отношения импеданса этих контуров не очевидно. Варианты 5 и 7 из Таблицы 1 имеют близкие значения коэффициента прямоугольности и соотношения резонансных частот, но при этом импеданс контуров отличается в полтора раза.

## 5. Выводы

В данной работе проведено численное моделирование схемы ёмкостного накопителя с прямоугольным выходным импульсом и одним разрядником. По результатам моделирования получены качественные зависимости коэффициента прямоугольности от индуктивности модифицированной секции и индуктивности разрядника. Показана возможность получения прямоугольного выходного импульса в широком диапазоне величин индуктивности модифицированной секции и индуктивности разрядника, что позволяет говорить о возможности подбора параметров элементов накопителя для имеющихся в продаже величин ёмкости накопительных конденсаторов. Теоретически максимально возможный коэффициент прямоугольности в данной работе составил величину 0.38, т.е. длительность выходного импульса на уровне 95% составляет 38% от длительности импульса на уровне 10%.

## 6. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0001.

## 7. Список литературы

- [1] J.J. Leckbee, et al., Pulse shaping experiments on the RITS-6 accelerator, *Proc. 35th International Conference on Plasma Science*, Karlsruhe, Germany, 1, 2008; doi: 10.1109/PLASMA.2008.4590811
- [2] I. Smith, et al., Induction voltage adder architectures and electrical characteristics, *Proc. 14th IEEE International Pulsed Power Conference (PPC)*, Dallas, USA, vol. 1, 371, 2003; doi: 10.1109/PPC.2003.1277731
- [3] K. Thomas, et al., The MERLIN Induction Voltage Adder radiographic accelerator, *Proc. 21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*, Brighton, UK, 1, 2017; doi: 10.1109/PPC.2017.8291170
- [4] A.A. Kim, et al., Square pulse LTD, *Proc. 18th IEEE Pulse Power Conference (PPC)*, Chicago, USA, 917, 2011; doi: 10.1109/PPC.2011.6191539
- [5] A.A. Kim, et al., Square pulse linear transformer driver, *Phys. Rev. Spec. Top. -AC*, vol. 15(4), 040401, 2012; doi: 10.1103/PhysRevSTAB.15.040401
- [6] A.A. Kim, M.M. Mazarakis, V.M. Alexeenko, S.S. Kondratiev, J.J. Leckby, and B.V. Oliver, Square pulse LTD with 5th harmonic bricks, *Proc. 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, San Francisco, USA, 1, 2013; doi: 10.1109/PPC.2013.6627624