

Согласование параметров формирующих линий и импульсных трансформаторов в схемах импульсных модуляторов для питания мощных клистронов

И.В. Казарезов, А.А. Корепанов

Институт ядерной физики им. Будкера СОРАН, Новосибирск, Россия

Наиболее распространенной схемой формирования мощных импульсов микросекундного диапазона для питания различных импульсных СВЧ-приборов является схема модулятора линейного типа на базе искусственной формирующей линии (ФЛ), коммутатора и повышающего импульсного трансформатора (ИТ). Эффективность модулятора определяется как активными потерями в элементах генератора, так и потерями энергии при формировании фронта и среза импульса, причем, влияние потерь энергии, связанных с формированием фронта и среза импульса, наиболее существенно. КПД формирования импульса, учитывающий данные потери, определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{W_{\text{п}}}{\int_0^{t_{\text{оч.}}} u(t)i(t)dt}. \quad (1)$$

Здесь $W_{\text{п}}$ — энергия, выделяющаяся в нагрузке при формировании полки импульса, определяемой с заданной точностью; $t_{\text{оч.}}$ — длительность импульса по основанию. Из приведенного выражения ясно, что для увеличения КПД формирования импульса необходимо уменьшать длительность его фронта и среза при заданной длительности полки импульса. Основными параметрами, влияющими на величину фронта и среза импульса, являются постоянная времени трансформаторной цепи, тип ФЛ и число ее ячеек. Выбору указанных параметров и посвящается данная работа.

1. Постоянная времени трансформаторной цепи и выбор типа ФЛ

В работе [1] показано, что с достаточной степенью точности процессы формирования фронта и среза импульса с помощью ИТ можно анализировать по упрощенной схеме, представленной на рис. 1.

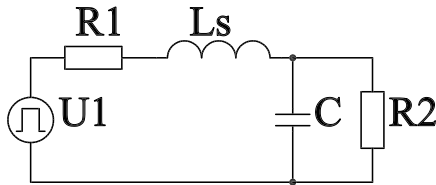


Рис. 1: Эквивалентная схема трансформаторной цепи.

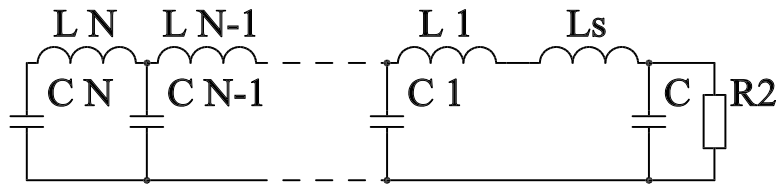


Рис. 2: Расчетная схема ОФЛ.

Все параметры эквивалентной схемы приведены ко вторичной обмотке. Здесь $L_S = L_{S_{\text{тр}}} + L_{S1}$ — сумма индуктивности рассеяния ИТ $L_{S_{\text{тр}}}$ и индуктивности первичной цепи L_{S1} ; $C = C_{\text{тр}} + C_2$ — сумма динамической емкости ИТ $C_{\text{тр}}$ и емкости нагрузки C_2 ; $R1$ и $R2$ — сопротивления генератора и нагрузки, соответственно. Постоянная времени трансформаторной цепи определяется с учетом паразитных параметров первичной и вторичной цепей:

$$\tau = \sqrt{(L_{S_{\text{тр}}} + L_{S1})(C_{\text{тр}} + C_2)}. \quad (2)$$

Важным вопросом при проектировании импульсного модулятора является выбор коэффициента трансформации ИТ n , а значит, при заданных параметрах коммутатора, и типа ФЛ. Наиболее распространенным типом обмоток мощных ИТ микросекундного диапазона являются однослойные обмотки с согласным включением. Известно (см. например [1]), что динамическая емкость таких обмоток пропорциональна

$$C_{\text{тр}} \sim (n - 1)^2/n^2, \quad (3)$$

а индуктивность не зависит от n вообще. Таким образом, если пренебречь влиянием индуктивности первичной цепи L_{S1} , то зависимость постоянной времени τ от коэффициента трансформации n будет следующей:

$$\tau \sim \sqrt{c_1 \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 + C_2}. \quad (4)$$

Здесь константа c_1 не зависит от n . Из этого соотношения видно, что постоянная времени трансформаторной цепи очень слабо растет при увеличении n . Например, при изменении коэффициента трансформации с 14 до 7 постоянная времени n может увеличиться максимум в 1.08 раза (при нулевой емкости нагрузки C_2). Однако в общем случае следует учитывать влияние L_{S1} на увеличение фронта импульса.

Индуктивность первичной цепи $L'_{S1} = L_{S1}/n^2$ (штрихом обозначаются величины, приведенные к виткам первичной обмотки ИТ) в основном состоит из индуктивности тиратрона и индуктивности соединений между ФЛ, тиратроном и ИТ. Корректный анализ зависимости величины L'_{S1} от n затруднен, так как эта индуктивность нелинейно зависит от напряжения, поэтому далее для простоты предполагается, что L'_{S1} не зависит от первичного напряжения, а значит, и от коэффициента трансформации. Это допущение даст оценку сверху для зависимости τ от n . Действительно, при заданной величине L'_{S1} соотношение для постоянной времени (2) можно переписать следующим образом:

$$\tau = \sqrt{\left(L_{S\text{тр}} + L'_{S1} \cdot n^2\right) \cdot \left(c_1 \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 + C_2\right)}. \quad (5)$$

Из данного соотношения видно, что при большом n влияние L_{S1} на постоянную времени может быть значительным. Поэтому для снижения коэффициента трансформации и увеличения первичного напряжения иногда используется двойная ФЛ (ДФЛ) с выходным напряжением равным зарядному. Следует отметить, что ДФЛ имеет свои недостатки:

- переполюсовка напряжения на конденсаторах первой части ДФЛ приводит к уменьшению срока их службы;
- повышенные потери в первой части ДФЛ, связанные с увеличенной длительностью и амплитудой тока, протекающего по ней;
- усложняется высоковольтное исполнение первичной обмотки ИТ и соединений с ДФЛ;
- при пробое клистрона в нем выделяется больше энергии, чем в схеме с одинарной ФЛ; цепи защиты при этом усложняются;
- требуется по меньшей мере удвоенное количество элементов линии, что усложняет и удорожает исполнение ДФЛ.

Из сказанного выше следует, что при заданных параметрах коммутатора в случае примерно одинаковых искажений импульса (затягивание фронта и среза) лучше использовать одинарную ФЛ, чем ДФЛ.

На примере генератора, питающего клистрон для проекта линейного ускорителя JLC [3], было проведено сравнение формы импульса напряжения на нагрузке и КПД формирования импульсов для схем модуляторов на основе одинарной и двойной ФЛ с двумя коэффициентами трансформации 14 и 7 соответственно.

Параметры импульса на нагрузке:

Амплитуда напряжения — 560 кВ;

Амплитуда тока — 503 А;

Длительность импульса по полке — 1.5 мкс.

Индуктивность рассеяния ИТ и суммарная емкость вторичной цепи взяты из [2]: $L_{Стр} = 120$ мкГн, $C = 250$ пФ. Для простоты при моделировании током намагничивания можно пренебречь. Число ячеек в обеих схемах ФЛ было выбрано 20 (в ДФЛ 2×20). Увеличением емкости C при увеличении коэффициента трансформации вдвое можно пренебречь, так как емкость ИТ составляет лишь $\sim 1/3$ от суммарной емкости C . Поэтому в процессе численного моделирования двух схем ФЛ различия в них состояли только в дополнительной индуктивности первичной цепи $L_{S1} = L'_{S1} \cdot n^2$.

Результаты анализа данных схем приведены в табл. 1. Из данной таблицы следует, что эффективность формирования импульсов в схеме одинарной ФЛ $\eta_{од.}$ не хуже, чем в схеме ДФЛ $\eta_{дв.}$, вплоть до значений индуктивности первичной цепи $L_{S1}/L_s \approx 1$ (при $n = 14$) или $L_{S1}/L_s \approx 0.25$ (при $n = 7$). Таким образом, при одинаковом КПД схемы формирования следует отдавать предпочтение одинарной ФЛ.

Таблица 1: КПД формирования импульсов в схемах одинарной и двойной ФЛ.

$L'_{s1}, \text{мкГн}$	0.4	0.5	0.6	0.8	1
$\eta_{од.}(n = 14)$	0.782	0.78	0.77	0.757	0.749
$\eta_{дв.}(n = 7)$	0.777	0.776	0.775	0.764	0.752

2. Выбор числа ячеек для ФЛ

Особенностью проектирования ФЛ для мощных генераторов с ИТ являются заданные параметры трансформаторной цепи: ее суммарная индуктивность и емкость. Для получения высокого КПД формирования импульсов параметры ФЛ (индуктивность и емкость ячеек) должны быть такими, чтобы длительность фронта определялась в основном параметрами трансформаторной цепи, а не параметрами ФЛ. Влиянием конечного времени включения коммутатора на фронт импульса можно пренебречь, так как в большинстве случаев использующиеся тиратроны имеют времена открывания в несколько раз меньшие, чем фронт импульса.

Методику выбора числа ячеек ФЛ можно показать на примере одинарной ФЛ. На рис. 2 показана схема одинарной ФЛ с эквивалентной схемой трансформаторной цепи и резистивной нагрузкой. В результате численного моделирования переходных процессов в данной схеме была получена (рис. 3) зависимость КПД формирования импульсов η от числа ячеек N в ФЛ при различных постоянных времени трансформаторной цепи (волновое сопротивление этой цепи выбиралось примерно равным сопротивлению нагрузки, так как в этом случае КПД максимален). Неравномерность полки при этом была примерно равна $\pm 1\%$. Полученные данные позволяют выбирать число ячеек, необходимое для получения требуемого КПД при заданной постоянной времени трансформаторной цепи.

Из рис. 3 следует, что для любой постоянной времени трансформаторной цепи существует значение числа ячеек N , больше которого КПД формирования практически не изменяется. Поэтому выбор слишком большой величины N не оправдан с точки зрения длительности фронта и КПД. Более того, при увеличении числа ячеек ФЛ токовая нагрузка на конденсаторы линии

увеличивается. Это связано с уменьшением длительности импульсов тока через конденсаторы при увеличении числа ячеек.

Кроме этого, увеличение числа ячеек в линии может привести к усилению влияния паразитной индуктивности конденсаторов ФЛ L_C . Эффективность формирования импульсов падает из-за затягивания среза импульса. Зависимость η от величины L_C/L_0 была исследована на примере 10-ячеечной ОФЛ, нагруженной на согласованную резистивную нагрузку. Неравномерность полки импульса поддерживалась на уровне $\pm 1\%$.

На рис. 4 показаны результаты этого моделирования. При увеличении числа ячеек N в ФЛ индуктивность L_C растет $\sim N$, а индуктивность ячейки L_0 падает $\sim 1/N$. Поэтому при увеличении N негативное влияние индуктивности конденсаторов L_C на КПД будет возрастать.

Таким образом, можно сделать вывод — постоянная времени трансформаторной цепи однозначно определяет число ячеек в ФЛ, при котором получаются лучшие характеристики импульса.

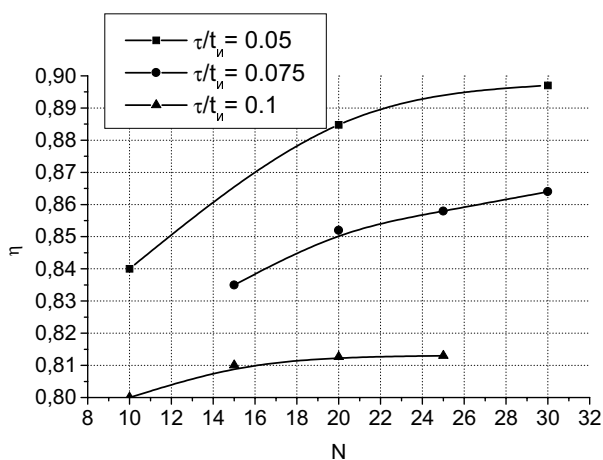


Рис. 3: Зависимость КПД формирования импульсов от числа ячеек ОФЛ при различных значениях постоянной времени трансформаторной цепи.

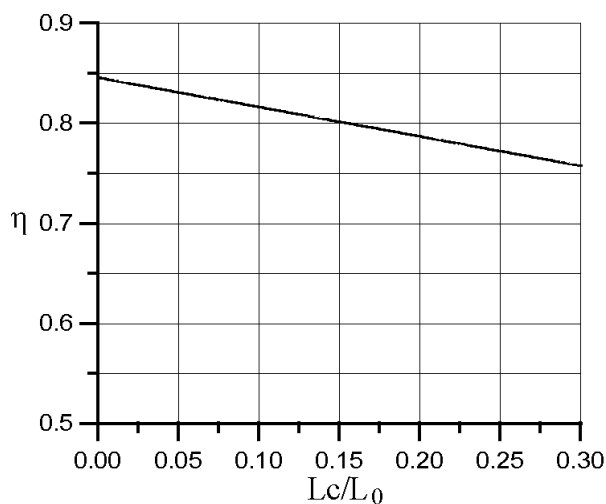


Рис. 4: Зависимость КПД формирования импульсов от паразитной индуктивности конденсаторов для 10-ячеечной ОФЛ.

Список литературы

- [1] Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. “Энергия”, Л., 1971, 148 с.
- [2] Pulse transformer R&D for NLC klystron pulse modulator / M. Akemoto, S. Gold, A. Krasnyh and R. Koontz, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford CA 94309.
- [3] Akemoto M., Tokumoto S., Anami S., Mizuno M. Blumlein type of modulator at KEK. — Third Annual Klystron-Modulator Workshop, June 23-25, 1998, Workshop paper.