

ИМПУЛЬСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР НА ОТРЕЗКАХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ С РАЗВЕТВЛЕННЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Кононов А.И.¹, Дегтерёв Е.Г.¹, Мешков А.Н.¹

¹ГОУ ВПО «Нижегородский Государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Н. Новгород, Россия (603950, Н. Новгород, ГСП ул. Минина, 24), e-mail: nntu@nntu.nnov.ru, alex.kohohob@gmail.com

Импульсные трансформаторы на отрезках линии передачи применяют для преобразования мощных видеоимпульсов наносекундного диапазона. При повышении напряжения на входе трансформатора линии соединяют параллельно, на выходе – последовательно. Ранее применяли в качестве линий отрезки коаксиального кабеля. В данной работе рассмотрен новый тип трансформатора, в котором вместо коаксиального кабеля применены полосковые линии, а для уменьшения шунтирующего действия соседних линий на выходе трансформатора применен разветвленный магнитопровод. В результате повышена мощность трансформируемых импульсов, трансформатор стал полностью экранирован. Приведены расчетные соотношения геометрических параметров магнитопровода, режима магнитных и электрических полей. Проведена экспериментальная проверка работоспособности устройства при трансформации импульса длительностью 7 нс, мощностью 0,2 МВт до напряжения 3 кВ.

Ключевые слова: трансформатор, наносекундный импульс, полосковая линия, магнитопровод

PULSE TRANSFORMER ON A SEGMENT OF STRIP LINES WITH AN EXTENSIVE MAGNETIC CIRCUIT

Kononov A.I.¹, Degterev E.G.¹, Meshkov A.N.¹

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, Mininast., bld.24), e-mail: e-mail: nntu@nntu.nnov.ru, alex.kohohob@gmail.com

Pulse transformers designed with the transmission line is used to convert powerful nanosecond video pulses. In step-up transformer the input transmission line of the transformer is connected in parallel, at the output - in series. In this paper, we consider a new type of transformer, in which instead of coaxial cable used stripline, and to reduce the shunting effect of adjacent transmission lines at the output of the transformer applied magnetic branched. As a result of increased power transformed pulse transformer became fully shielded. Gives the calculated ratio of the geometric parameters of the magnetic circuit, the mode of magnetic and electric fields. An experimental performance testing of devices in the transformation of 7 ns pulse duration, with a capacity of 0.2 MW, to a voltage of 3 kV.

Keywords: transformer, nanosecond pulse, strip line, magnetic

В известных ранее трансформаторах на отрезках коаксиального кабеля для уменьшения шунтирующего действия оболочек соседних кабелей на оболочки надевают ферритовые сердечники [1]. В работе [2] предложено экранировать такие сердечники. Ниже предложена другая конструкция трансформатора, где в качестве отрезков линии передачи используются несимметричные полосковые линии, а для уменьшения шунтирующего действия применен разветвленный магнитопровод из феррита.

Конструкция предлагаемого трансформатора схематически представлена на рисунке 1. Здесь номинальный коэффициент трансформации равен 4.

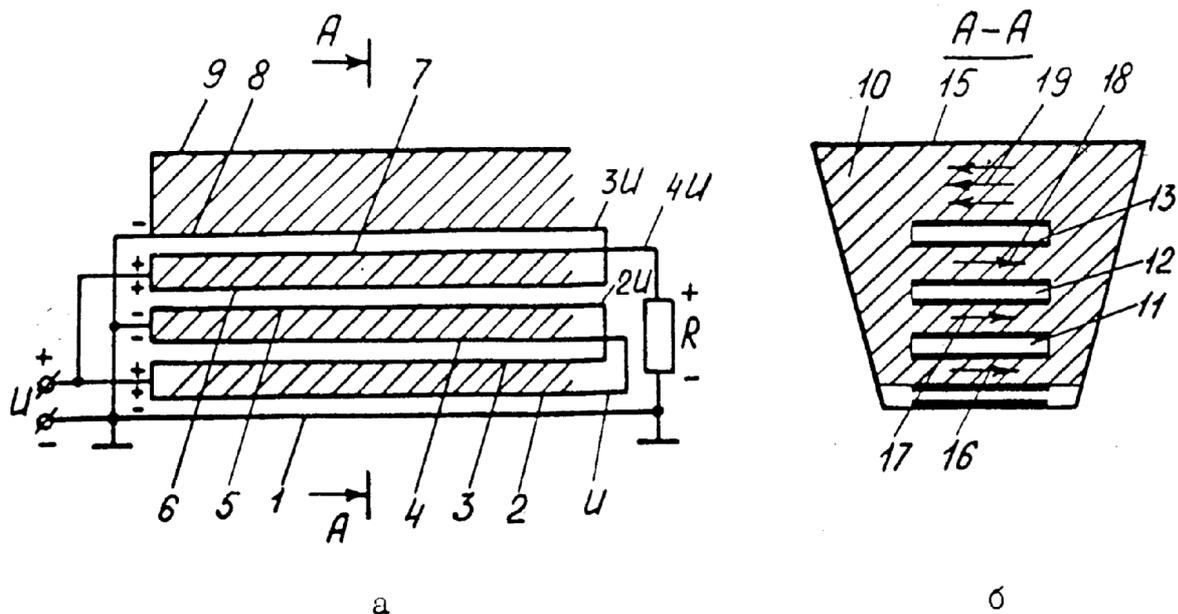


Рис. 1. Импульсный трансформатор на отрезках полосковых линий с разветвленным магнитопроводом: а) U – напряжение на входе, «+», «-» – полярность напряжений на входе полосковых линий, $2U$, $3U$, $4U$ – потенциалы проводников на выходе, 1 – 2; 3 – 4; 5 – 6; 7 – 8 – проводники полосковых линий, 9 – проводник, экранирующий весь объем трансформатора, б) Сечение трансформатора по А – А, 10 – разветвленный магнитопровод, 11 – 13 – полосковые линии, 16 – 19 – направление силовых линий магнитного поля, 15 – внешний экран

Принцип действия трансформатора следующий. С момента появления напряжения на нагрузке по шунтирующим полосковым линиям, образованным попарно проводниками 2 и 3, 4 и 5, 6 и 7, 8 и 9, протекают волны шунтирующих токов. Направления их магнитных полей таковы (16 – 19), что они целиком замыкаются в ферритовом магнитопроводе.

Шунтирующая линия представляет собой одновитковый дроссель с ферритовым заполнением, и для расчета конструкции магнетика можно применить следующую методику. Намагничивание феррита происходит при переходе в нагрузку плоской части вершины импульса с длительностью τ и напряжением U на входе шунтирующей линии. Насыщение сердечника должно произойти не раньше, чем в момент τ . В соответствии с законом электромагнитной индукции для этого площадь сечения сердечников должна составлять $S = U\tau/\Delta B$, где ΔB – приращение индукции феррита. Если не применять магнитное смещение, то для ферритов ΔB имеет величину около 0,3 Тл.

$S = d \cdot x$, где d – толщина ферритового слоя между соседними полосковыми линиями, x – длина трансформатора, т. е.

$$x = \frac{U\tau}{\Delta B d} \quad (1)$$

При трансформации импульсов с коротким фронтом (~ 1 нс) следует уменьшать поперечные размеры на выходе трансформатора с целью сокращения длины монтажных

соединений с нагрузкой. Минимальная толщина магнетика между соседними полосковыми линиями ограничена максимальной напряженностью электрического поля в магнитопроводе. Для ферритов эта величина ограничена напряженностью 5 кВ/мм [3].

Напряженность магнитного поля шунтирующих линий максимальна вблизи верхней (рис. 1а) полосковой линии, где средняя длина силовой линии магнитного поля $l = 2(a + d)$, a – ширина полосковой линии. В соответствии с законом полного тока напряженность магнитного поля в феррите $H = I/l$, где I – ток шунтирующей линии, который не должен превышать 0,1 от тока нагрузки. Если ρ – волновое сопротивление полосковой линии, то $I = 0.1U/\rho$ и

$$H = \frac{0.1U}{\rho l}. \quad (2)$$

С ростом мощности импульсов (с уменьшением ρ и увеличением U) напряженность магнитного поля может вырасти до максимальной, соответствующей напряженности насыщения H_m .

Величину H_m следует определить, используя статистику экспериментальных данных по перемагничиванию сердечников в сильных магнитных полях при времени перемагничивания в наносекундном диапазоне. Аналогичный режим имеет место в трансформаторах и дросселях магнитно-транзисторных генераторов [3], где среднее значение H_m составляет около 0,25 кА/м.

Нетрудно провести аналогию между трансформаторами на линиях передачи и трансформаторами сосредоточенного типа. Известно, что достоинствами трансформатора на отрезках длинных линий являются сравнительно равномерное распределение напряжения по линиям на выходе схемы и малая величина паразитных параметров (по сравнению с обычным импульсным трансформатором на ферромагнитном сердечнике). Это позволяет трансформировать импульсы с небольшими искажениями длительностью в десятки наносекунд и напряжением в сотни киловольт.

Требование хорошей передачи фронта (и спада) импульсов напряжений определяет конфигурацию магнитопровода в плоскости, перпендикулярной направлению распространения импульса по линиям. Длина же трансформатора в направлении распределения импульса и площадь поперечного сечения в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля, определяются низкочастотной частью импульса, его плоской вершиной. При передаче низкочастотной составляющей (когда можно пренебречь временем пробега по основным отрезкам линий, которыми образован трансформатор) трансформатор на отрезках линий эквивалентен сосредоточенному трансформатору или автотрансформатору.

Прежде чем находить эквивалентную схему трансформатора на четырех полосковых линиях (рис. 1), рассмотрим вначале два более простых примера.

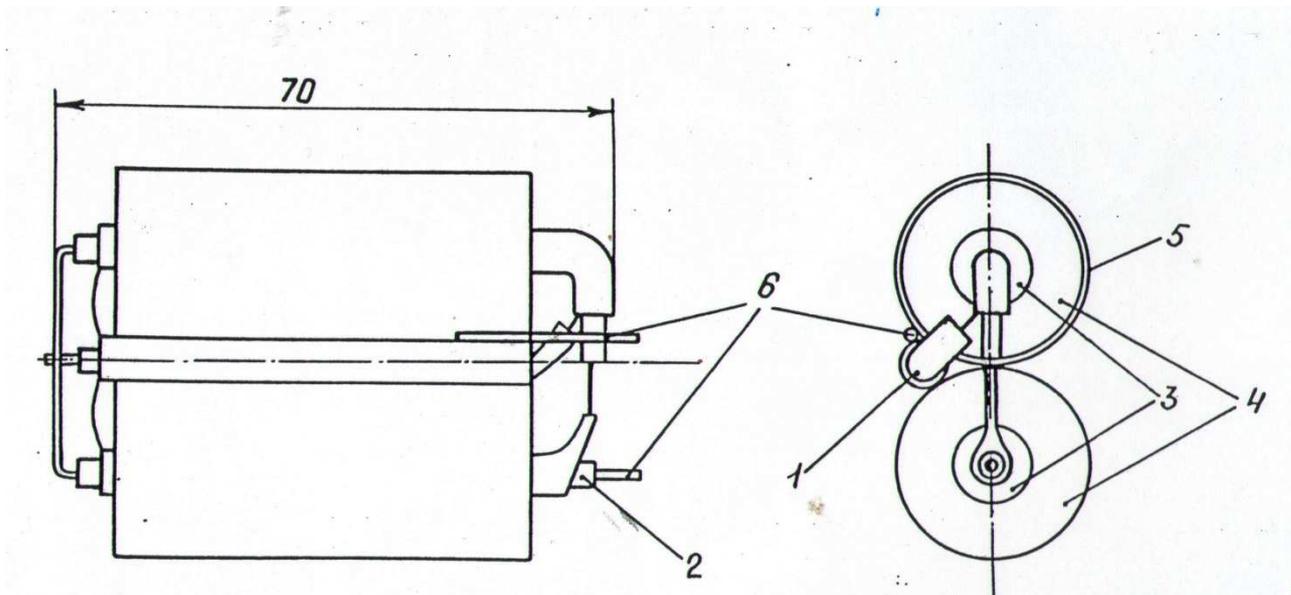


Рис. 2. Трансформатор на трех кабелях. 1 – кабель с заземленной оболочкой на входе и выходе, 2 – кабель с наивысшим потенциалом, 3, 4 – сердечники из феррита 1000 НН К 17х5х8 и 600 НН К 30х17х7, 5 – экран, соединенный с оболочкой первого кабеля, 6 – выходные клеммы

Трансформатор, показанный на рисунке 2, применен в наносекундном модуляторе электронной пушки с амплитудой до 20 кВ. Он выполнен в виде последовательно-параллельного соединения трех коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 37 Ом и длиной 7 см. На оболочки второго и третьего кабеля надеты ферритовые кольца. У второго кабеля они помещены в цилиндрический экран, который на входе и выходе соединен с оболочкой первого кабеля. Экран третьего кабеля, предназначенный для снижения уровня помех в окружающее пространство и одновременно являющийся наружным кожухом заполненного маслом трансформатора, на рисунке не показан. Он имеет диаметр 50 мм и неплотно прилегает к ферриту. Трансформатор повышает напряжение с 7 до 20 кВ при длительности импульса 10 нс, длительности фронта и спада 1,5 нс. Как показывает расчет волнового сопротивления шунтирующей коаксиальной линии по методике ударных электромагнитных волн, при данном уровне напряжений оно составляет 700 Ом. Габариты трансформатора 32х64х70 мм.

Рассмотрим контуры токов первичной и вторичной цепей трансформатора (рис. 2). Контур тока первичной цепи имеет две параллельные ветви. Одна ветвь охватывает одним витком экранированный сердечник, другая ветвь проходит через оба сердечника, делая по одному витку. Контур тока вторичной цепи охватывает одним витком оба сердечника, причем первый виток на экранированном сердечнике общий для первичной и вторичной

цепи. Отсюда следует, что эквивалентная схема такого трансформатора для низкочастотных составляющих будет как на рисунке 3, а, а эквивалентная схема – как на рисунке 3, б. Эквивалентом будет соединение автотрансформатора и трансформатора. На рисунках показаны напряжения обмоток и их полярность.

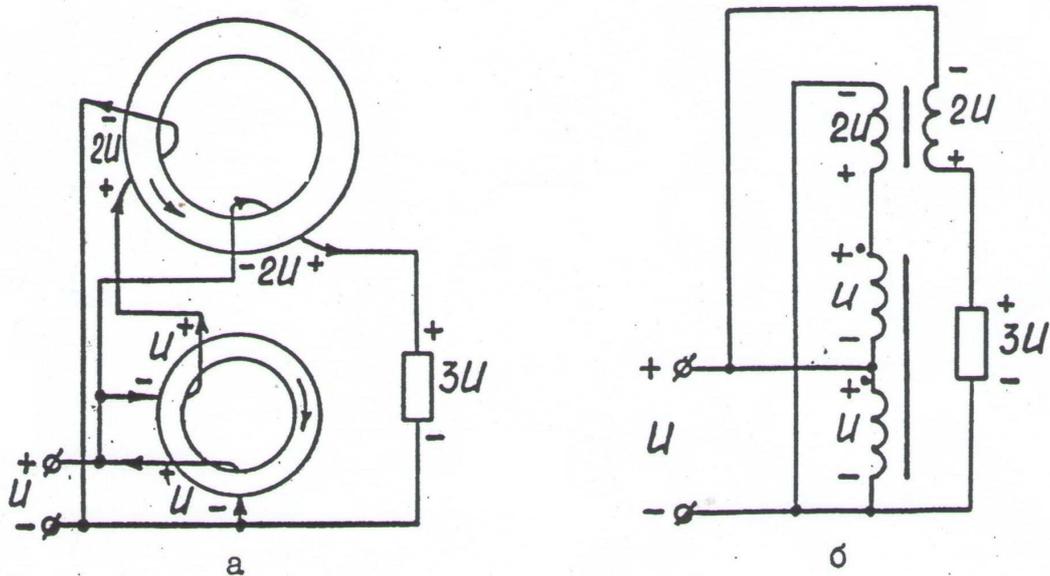


Рис. 3. Эквивалентная конструкция (а) и эквивалентная схема (б) трансформатора рис. 2 для низких частот

Другой пример — трансформатор на двух полосковых линиях (рис. 4).

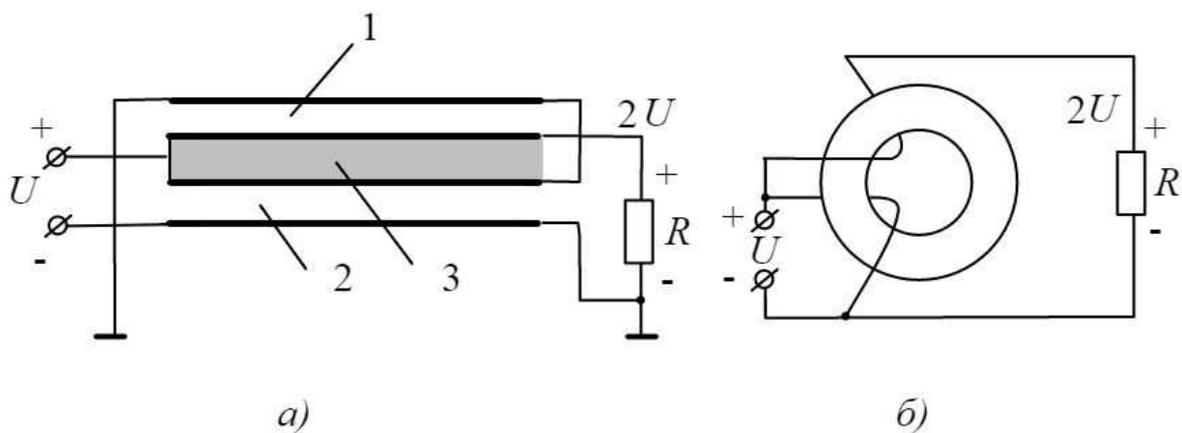


Рис. 4. Трансформатор на двух отрезках полосковых линий.
 а) 1, 2 – полосковые линии, 3 – ферритовый магнитопровод.
 б) эквивалентная схема для низких частот.

На рисунке обозначены полярность напряжений, потенциалы в отдельных точках.

Контур тока первичной цепи один раз охватывает сердечник 3. Контур вторичного шунтирующего тока, проходящего через нагрузку, охватывает сердечник дважды, причем первый виток совпадает с витком первичного контура. Следовательно, эквивалентная схема трансформатора для низкочастотных составляющих будет как на рисунке 2 б.

Анализируя подобным образом трансформатор на четырех полосковых линиях (рис. 1), нетрудно установить, что его эквивалентная схема будет как на рисунке 3.

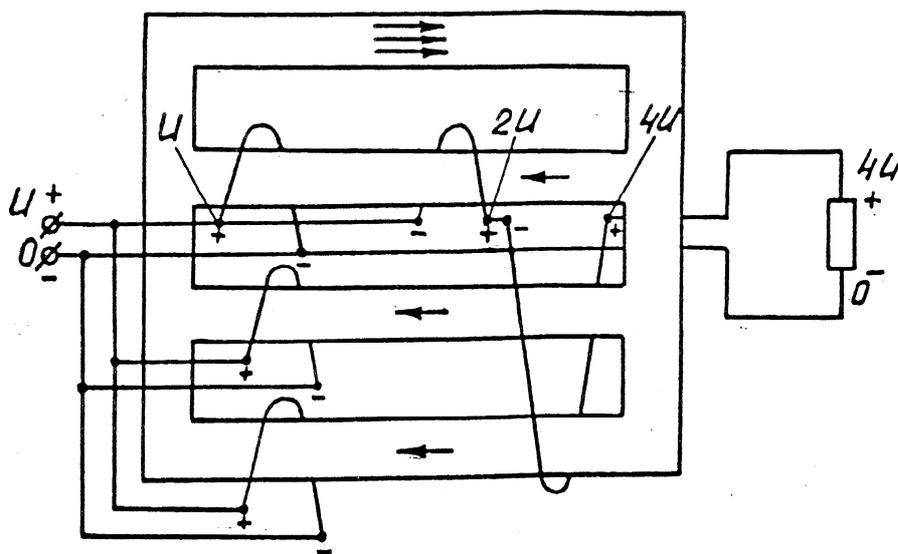


Рис. 5. Эквивалентная схема трансформатора рисунка 1.

Обозначены потенциалы отдельных точек схемы.

Здесь контур тока первичной цепи разделен на три параллельные ветви, каждая из которых одним витком охватывает первую, вторую и третью ветви магнитопровода. Контур тока вторичной цепи охватывает двумя витками третью ветвь магнитопровода и еще последовательно, одним общим витком, вторую и первую ветви магнитопровода. На третьей ветви магнитопровода первый виток вторичной цепи (имеет гальваническую связь) с витком первичной цепи. На рисунке обозначены полярность напряжений на обмотках, потенциалы в отдельных точках, направление напряженности магнитного поля в ветвях сердечника (число стрелок пропорционально потоку индукции).

Введение эквивалентных схем трансформатора на отрезках линий передачи для низкочастотных составляющих существенно упрощает рассмотрение процессов в магнитной части трансформаторов, позволяет установить аналогию распределенных и сосредоточенных трансформаторов, использовать в ряде случаев методику расчета наносекундных импульсных трансформаторов сосредоточенного типа, упрощает проверку трансформаторов при проектировании и изготовлении.

Для экспериментальной проверки собран трансформатор такого типа на четырех полосковых линиях с волновым сопротивлением 10 Ом, шириной 42 мм и длиной 170 мм. Толщина ферритового слоя между линиями 10 мм. Марка феррита 1000НН. Испытания

проведены путем трансформирования импульса длительностью 7 нс, напряжением (на выходе) 3кВ. Реальный коэффициент трансформации 3,5. Испытания показали, что разветвленный магнитопровод позволил сократить габариты трансформатора и экранировать его конструкцию.

Список литературы

1. Кладухин В.В. ПТЭ, № 3, май-июнь 2013. С. 53–57.
2. Кремнев В.В. Методы умножения и трансформации в силовоточной электронике. В.В.Кремнев, Г.А. Месяц. – Новосибирск.: Наука. 1987. С. 6.
3. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. Г.А. Месяц. – М.: Советское Радио. 1974. С. 77.
4. Мешков А.Н., Шишко В.И. ПТЭ, № 5, 1976. С. 166.
5. Мешков А.Н. ПТЭ, № 1, 1990. С. 23.

Рецензенты:

Катин С.В., д.т.н., ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», г. Нижний Новгород;

Орехов Ю.И., д.т.н., ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», г. Нижний Новгород.