

Расчёт собственного импеданса ферритовых втулок в составе электрических цепей на основе измерений во временной области

Часть 2

Николай Лемешко (nlem83@mail.ru),
 Михаил Горелкин (Mikhail.Gorelkin@rohde-schwarz.com),
 Павел Струнин (Pavel.Strunin@rohde-schwarz.com)

В статье описывается метод расчёта компонент комплексного сопротивления ферритовых втулок, основанный на использовании экспериментальных данных, полученных в результате измерений во временной области. Во второй части работы рассмотрены типовые изменения формы импульсов при их прохождении через ферритовые втулки. Приведены примеры соответствующих расчётов, основанные на результатах измерений, полученных с применением средств измерений компании Rohde&Schwarz.

Типовое изменение формы импульсов при наличии ФВ в измерительной схеме

На основе аппроксимации для марганцево-цинкового феррита, полученной в первой части статьи [17], можно оценить изменение формы тестового импульса в схеме на рисунке 16. Для этого будем рассматривать импульсы прямоугольной и синусоидальной формы со значением $\tau = 10^{-9}$ и 2×10^{-9} нс соответственно ($f_M = 1$ ГГц). Результаты моделирования, полученные с использованием прямого и обратного преобразований Фурье при восьмикратном запасе по полосе частот, представлены на рисунках 6 и 7. Схема измерений принята идеальной, не имеющей паразитных электрофизических характеристик, т.е. $L_2 = 0$.

На рисунках 6 и 7 расчётные осциллограммы сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ показаны пунктирной и непрерывной кривыми, причём сигнал $s_2(t)$ рассчитан по формуле (4). Дополнительно точками показана зависимость $s_1^*(t)$, получен-

ная обратным преобразованием Фурье в полосе частот от $-f_M$ до f_M .

На основе результатов численного исследования можно сделать следующие выводы:

1. для повышения точности расчёта спектральных плотностей $S_1(f)$, $S_2(f)$ по формулам (2) осциллограммы сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ должны весьма точно совмещаться по времени. Если при измерениях не используются вспомогательные средства синхронизации, то достижимая точность совмещения раздельно регистрируемых сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ будет существенно зависеть от запаса измерительной системы по полосе частот: чем он выше, тем лучше;
2. с учётом возможного ограничения полосы тестового импульса измерительной системой, приводящего к появлению ненулевых значений сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ вне значений $|t| \leq \tau$ выборки, для последующей обработки должны регистрироваться

в интервале времени от $-q_1\tau$ до $q_2\tau$, где $q_1, q_2 \geq 1,5$. Значения этих параметров оцениваются по осциллограмме сигнала $s_2(t)$ с учётом возможных отклонений от неоднородности в виде проводной врезки в схеме на рисунке 16. Оценка влияния интервала времени на результаты расчёта $X(f)$ и $R(f)$ приведена в следующем разделе.

3. далее будут рассмотрены примеры измерений зависимостей $X(f)$ и $R(f)$ для образцов ФВ с использованием современных средств измерений, в частности осциллографов.

Примеры измерений зависимостей $X(f)$ и $R(f)$ для образцов ФВ с использованием средств измерений компании Rohde&Schwarz

Объекты исследований, средства измерений и оснастка. Для измерений были выбраны ферритовые втулки марки 74275813 производства Wurth Elektronik (ФВ № 1) и марки ZCAT1518-0730-ВК производства TDK (ФВ № 2). Согласно документации [16, 17], они имеют типовые зависимости полного импеданса от частоты, представленные на рисунке 8. Причём типовые значения импеданса для ФВ № 1 на частотах 25 и 100 МГц составляют 120 и 200 Ом, а для № 2 в диапазонах от 10 до 100 МГц и от 100 до 500 МГц – 25 и 50 Ом соответственно. Ориентировочный допуск на значения импеданса составляет $\pm 25\%$.

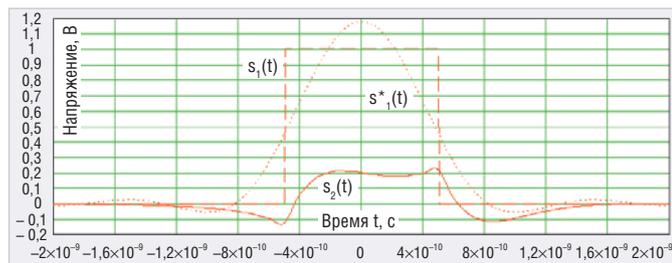


Рис. 6. Результаты моделирования прохождения одиночного прямоугольного импульса через цепь с ФВ с зависимостями $\mu'_a(f)$ и $\mu''_a(f)$, представленными на рисунке 5

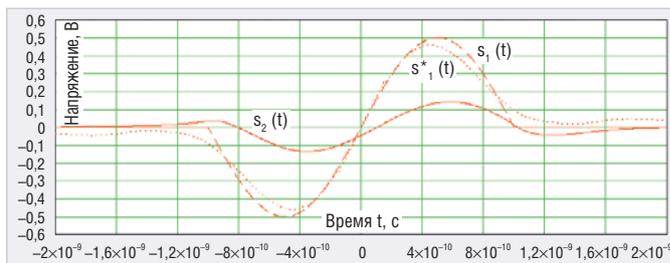


Рис. 7. Результаты моделирования прохождения одиночного импульса синусоидальной формы через цепь с ФВ с зависимостями $\mu'_a(f)$ и $\mu''_a(f)$, представленными на рисунке 5

Для апробации предложенного метода определения зависимостей $X(f)$ и $R(f)$ была выбрана полоса идентификации в интервале от 1 до 500 МГц. Последовательность выполнения измерений и расчётов для ФВ № 1 и № 2 включала:

- получение зависимостей $s_1(t)$ и $s_2(t)$ для импульсов длительностью 1 нс в соответствии с изложенными ранее принципами для расчёта функций $X(f)$ и $R(f)$;
- получение зависимостей $s_1(t)$ и $s_2(t)$ для импульсов длительностью 4 нс;
- контрольный расчёт зависимостей $s_2^*(t)$ и $s_2^{**}(t)$ по формулам (3) и (4) на основе передаточной функции $K(f)$, включающей найденные зависимости $X(f)$ и $R(f)$, для импульсов длительностью 4 нс.

При получении экспериментальных данных использовались схемы измерений, представленные на рисунке 1. В них использовался осциллограф R&S RTO2044 с полосой рабочих частот до 4 ГГц и четырьмя каналами. Входное сопротивление задействованного канала равнялось 50 Ом. Для формирования импульсов указанной длительности использовался внутренний модулятор векторного генератора сигналов R&S SMW200A с выходным сопротивлением 50 Ом. Период следования импульсов был равен 1 мс для исключения влияния остаточной намагниченности на результаты измерений. Номинальное амплитудное значение составляло 0,5 В при нагрузке 50 Ом, что исключало переход ФВ в насыщение. Специально для проведения экспериментов был изготовлен коаксиальный кабель с проводной врезкой, в отсутствие ФВ скрученной наподобие витой пары в соответствии с приведённым выше описанием. Для установки

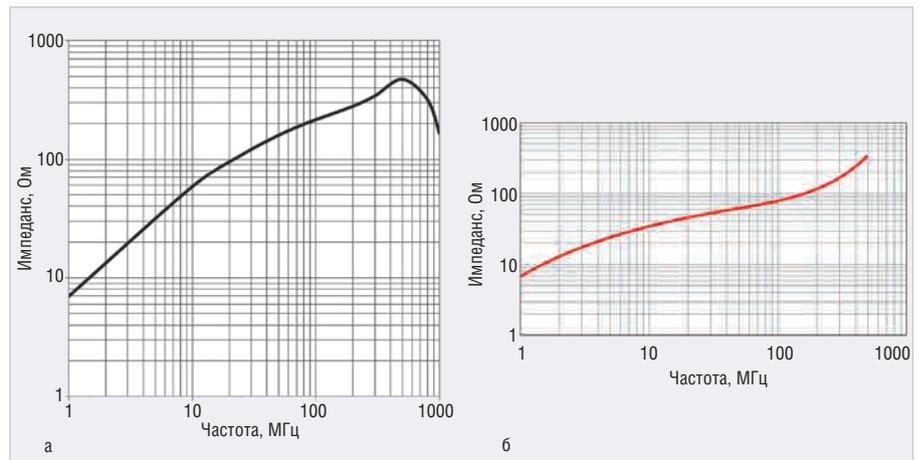


Рис. 8. Зависимости полного импеданса от частоты для ФВ № 1 (а) и для ФВ № 2 (б)



Рис. 9. Фотография измерительной установки (ФВ установлена на проводной врезке)

ФВ на проводной врезке использовался однополюсный разъём. Схема проведения измерений представлена на рисунке 9.

В ходе измерений для реализации последующих расчётов формы в графическом и численном виде регистрировались осциллограммы, полученные усреднением по десяти реализациям, что необходимо для снижения уровня шумов оцифровки. Расчёты осуществлялись на основе полученных выборок в предположении, что вне интер-

валов регистрации сигналы имеют нулевое значение.

Результаты измерений. На рисунке 10 представлены осциллограммы сигнала $s_1(t)$, полученные для импульсов длительностью 1 и 4 нс. Для внутреннего модулятора генератора сигналов R&S SMW200A длительность в 1 нс является минимально достижимой, поэтому импульс имеет форму, близкую к косинусоидальной. Слева от основных импульсов видны выбросы, обусловленные

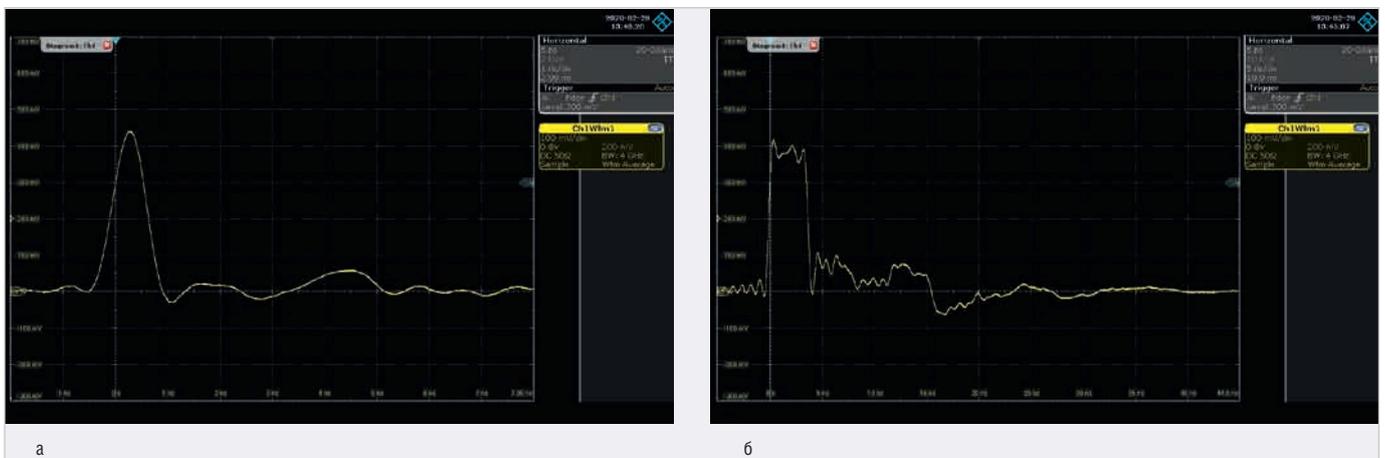


Рис. 10. Осциллограммы, полученные в отсутствие ФВ на кабельной врезке при длительности импульсов 1 нс (а) и 4 нс (б)

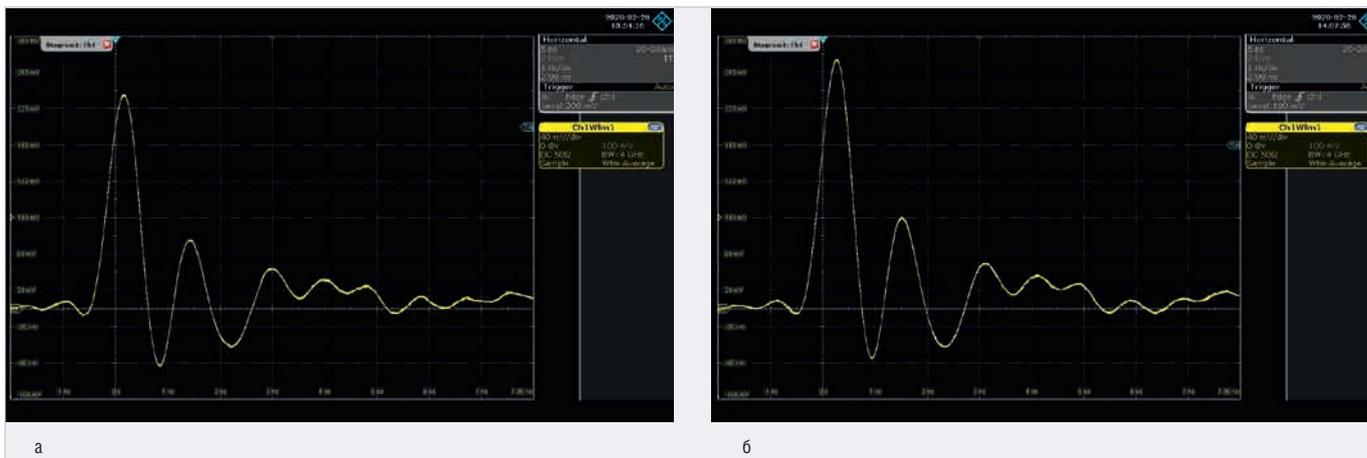


Рис. 11. Осциллограммы, полученные при прохождении импульса длительностью 1 нс через ФВ № 1 (а) и ФВ № 2 (б)

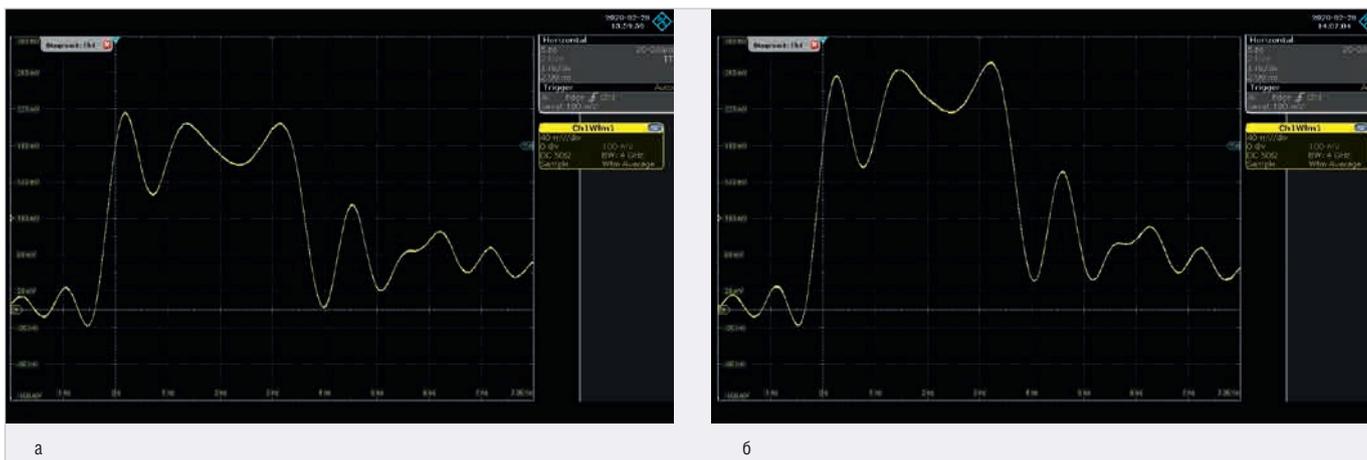


Рис. 12. Осциллограммы, полученные при прохождении импульса длительностью 4 нс через ФВ № 1 (а) и ФВ № 2 (б)

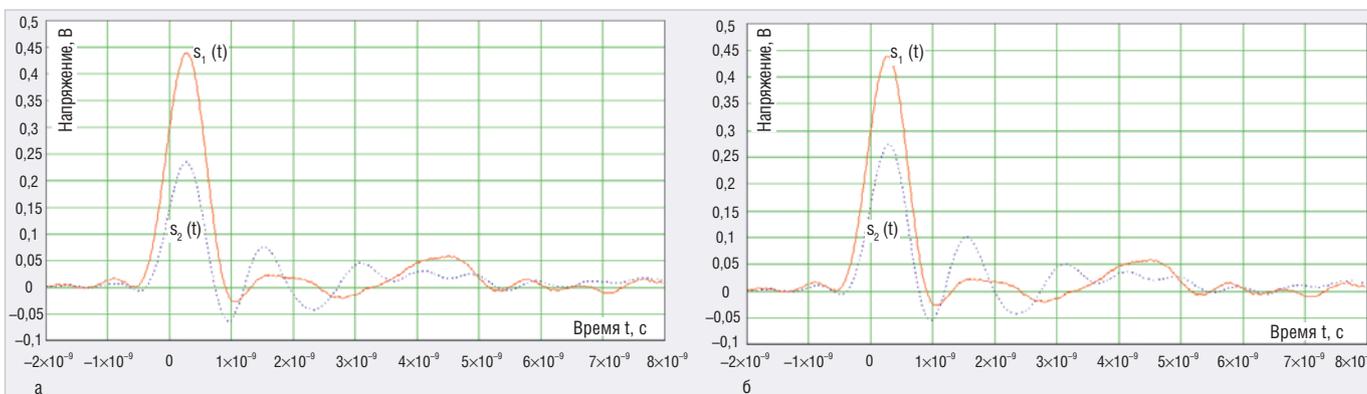


Рис. 13. Графики совмещённых функций $s_1(t)$ и $s_2(t)$ при длительности импульса 1 нс для ФВ № 1 (а) и ФВ № 2 (б)

отражениями из-за наличия проводной вставки, которая всегда имеет большее волновое сопротивление, чем коаксиальная линия [14]. При согласованном соединении цельной коаксиальной линией выбросы будут отсутствовать.

На рисунке 11 показаны осциллограммы, полученные при прохождении импульса длительностью 1 нс через ФВ № 1 и № 2. Для их получения использовался специальный режим синхронизации по фронту, при кото-

ром наличие условия запуска начинает проверяться через 5 нс после выполнения предыдущего условия. При включении в цепь ФВ № 1 и № 2 амплитуда импульса составила 238 и 275 мВ (с исходным значением 440 мВ).

Аналогичные результаты для импульса длительностью 4 нс показаны на рисунке 12. Здесь амплитуда импульсов для ФВ № 1 и № 2 составляет 215 и 270 мВ при исходном значении 420 мВ. Как следует из результатов измерений, ФВ № 1 очень эффективен в части ослабления помех.

Расчёт зависимостей $X(f)$ и $R(f)$ на основе результатов измерений. Выборки, соответствующие графикам на рисунках 10–12, являются исходными данными для расчёта спектральных плотностей в соответствии с (1). Для этого сигналы, соответствующие функциям $s_1(t)$ и $s_2(t)$, должны быть совмещены по времени, например по максимальному значению импульса, как это показано на рисунке 13. Для ФВ № 1 необходимое смещение составило 110 пс, для ФВ № 2 – 30 пс.

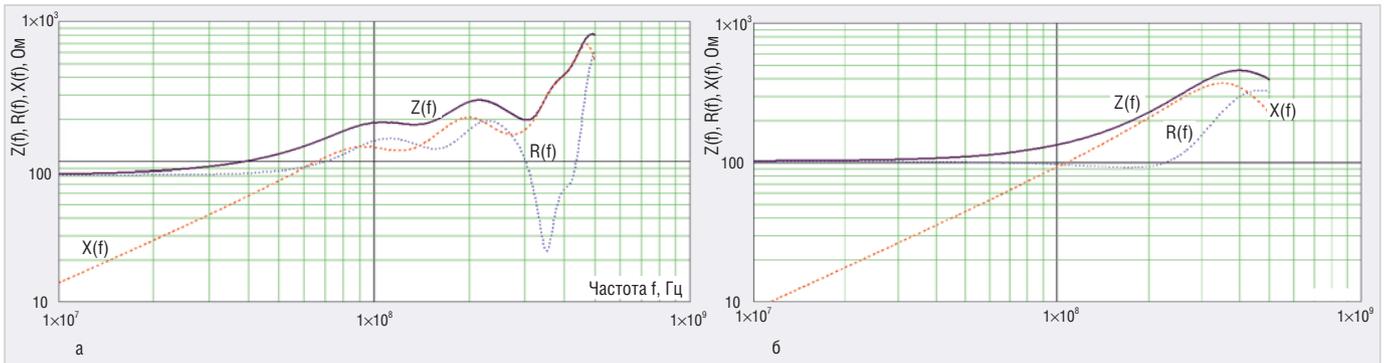


Рис. 14. Кривые $Z(f)$, $R(f)$ и $X(f)$, полученные для ФВ № 1 при расчёте спектральной плотности интегрированием в интервале от -2 до 8 нс (а) и от -2 до 2 нс (б)

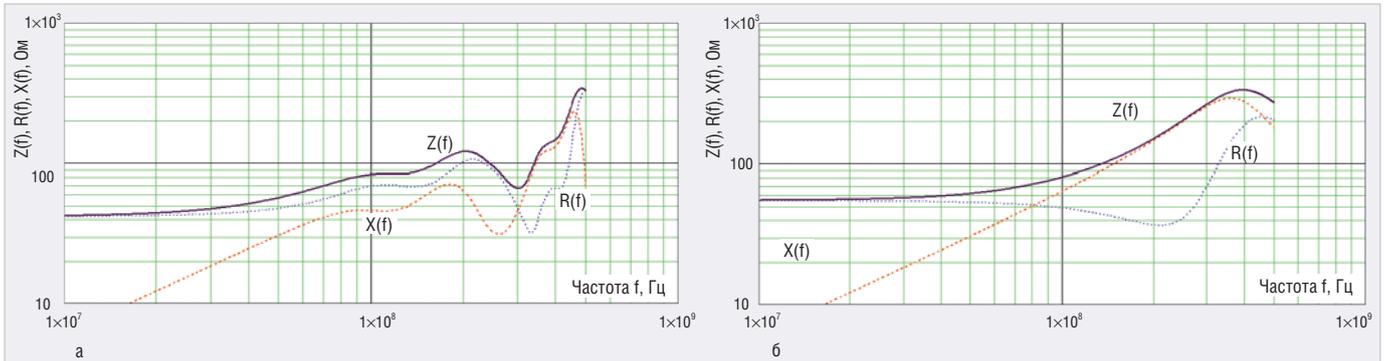


Рис. 15. Кривые $Z(f)$, $R(f)$ и $X(f)$, полученные для ФВ № 2 при расчёте спектральной плотности интегрированием в интервале от -2 до 8 нс (а) и от -2 до 2 нс (б)

При оцифровке каждого из графиков при помощи управления частотой дискретизации, предельное значение которой для осциллографов серии R&S RTO составляло 20 Гвыб/с, использовалось не менее 2000 точек, по которым строилась соответствующая кусочно-линейная аппроксимация. Для ФВ № 1 и № 2 принято, что $s_1(t) = s_2(t) = 0$ вне интервала $t = -2...8$ нс.

Для использования формулы (2) на основе данных справочника [12] были оценены индуктивности L_1 и L_2 по схеме на рисунке 1 для описанной реализации измерительной установки. В скрученном состоянии проводная врезка приближённо представляла собой последовательность плоских одновитковых индуктивностей в количестве $N_1 = 22$ шт. с диаметром $D_1 = 6$ мм, выполненных проводом радиусом $r = 0,4$ мм. Нормали к плоскости контуров можно считать аксиальными, поэтому между ними нет взаимной индуктивности и, соответственно, потокоцепления. С другой стороны, в развёрнутом состоянии врезка представляет собой одновитковую петлю диаметром $D_2 = 0,15$ м. Исходя из этого, учитывая весьма высокие частоты измерений и отсутствие вблизи врезки ферромагнитных материалов, выражения для L_1 и L_2 имеют вид [12]:

$$L_1 = N_1 \times \frac{\mu_0 \times D_1}{2} \times \left(\ln \left(\frac{D_1}{2r} \right) - 0,15 \right); \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 \times D_2}{2} \times \left(\ln \left(\frac{D_2}{2r} \right) - 0,15 \right).$$

В соответствии с формулами (8) и значениями входящих в них параметров $L_1 = 0,155$ мкГн и $L_2 = 0,479$ мкГн.

Для дальнейших вычислений был выбран интервал идентификации от 10 до 500 МГц. Как видно из рисунка 13, выполнять расчёт спектральных плотностей $S_1(f)$ и $S_2(f)$ можно как в пределах всего временного интервала регистрации сигналов, так и в небольшой окрестности основного импульса. На рисунках 14а и 14б показаны расчётные кривые для функций $R(f)$ и $X(f)$, а также полного импеданса $Z(f) = |R(f) + jX(f)|$ для ФВ № 1 при интегрировании в интервале от -2 до 8 нс и от -2 до 2 нс соответственно.

Аналогичные результаты для ФВ № 2 приведены на рисунке 15. В соответствии с рисунком 13б полный интервал регистрации составляет от -2 нс до 8 нс, а окрестность импульса может быть ограничена значениями -2 и 2 нс.

Сопоставляя расчётные зависимости $Z(f)$ с зависимостями, приведёнными на рисунке 8, можно сделать вывод о том, что при интегрировании в более узком интервале (см. рис. 14б, 15б) достигается значительно большее соответствие. Немонотонный характер возрастания значения

$Z(f)$ с увеличением частоты (см. рис. 14а и 15а) также плохо соотносится с современными представлениями о физике работы ферритов [5, 6, 15]. Такое расхождение связано с «изрезанностью» функций $|S_1(f)|$ и $|S_2(f)|$ при использовании расширенных интервалов интегрирования. Таким образом, интервал регистрации рекомендуется ограничивать небольшой областью, содержащей основной импульс.

Расчёт зависимостей $s_2^*(t)$ и $s_2^{**}(t)$ выполнялся для импульсов длительностью 4 нс в соответствии с формулами (4) и (5) для предельной частоты, равной 250 МГц. Сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$ для такого расчёта представлены на рисунке 16, смещение составило 0,3 нс.

На рисунке 17 показаны графики функций $s_2^*(t)$ и $s_2^{**}(t)$. Небольшое расхождение в форме сигналов обусловлено фазовыми погрешностями предложенного метода, связанными с точностью совмещения по времени импульсов, зарегистрированных с использованием схем на рисунках 1а и 1б, а также с неучтёнными свойствами элементов измерительной установки.

Таким образом, предложенный способ оценки частотных свойств ферритовых втулок получил практическую апробацию. Важным аспектом в расчётах является обеспечение сходимости используемых численных методов интегрирования, невыполнение которой способно привести к ошибочным резуль-

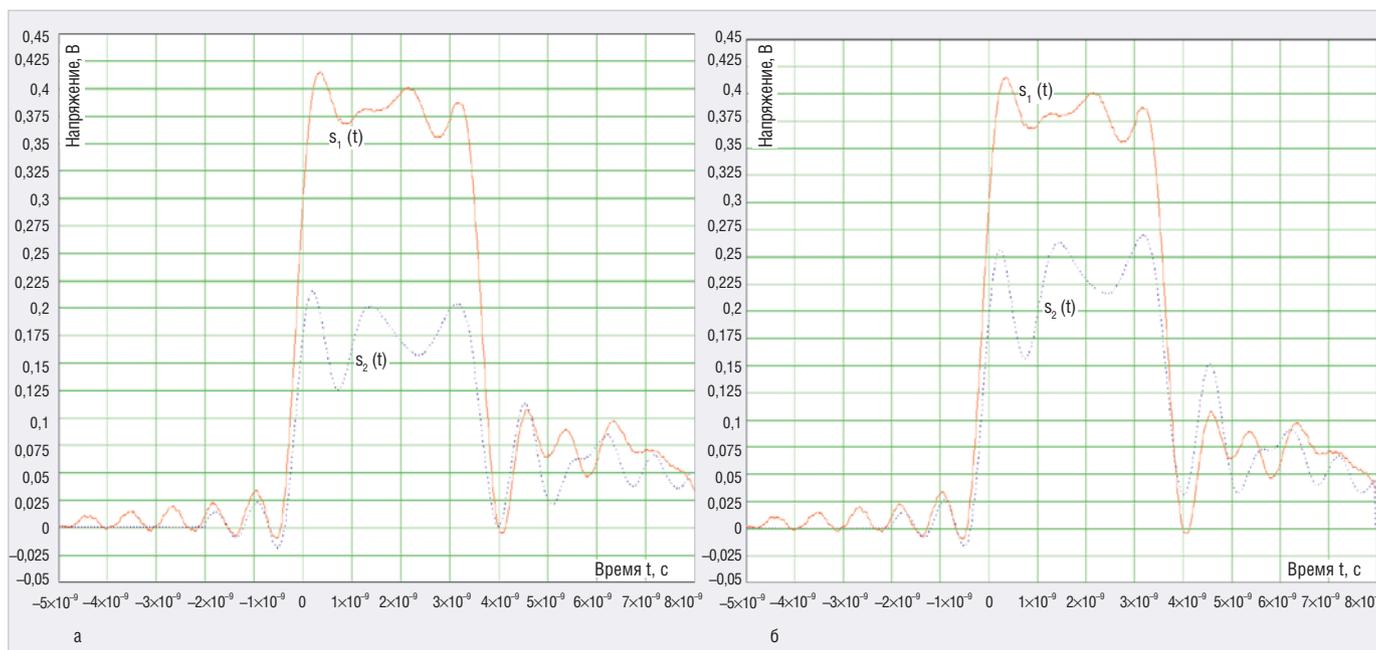


Рис. 16. Графики совмещённых функций $s_1(t)$ и $s_2(t)$ при длительности импульса 4 нс для ФВ № 1 (а) и для ФВ № 2 (б)

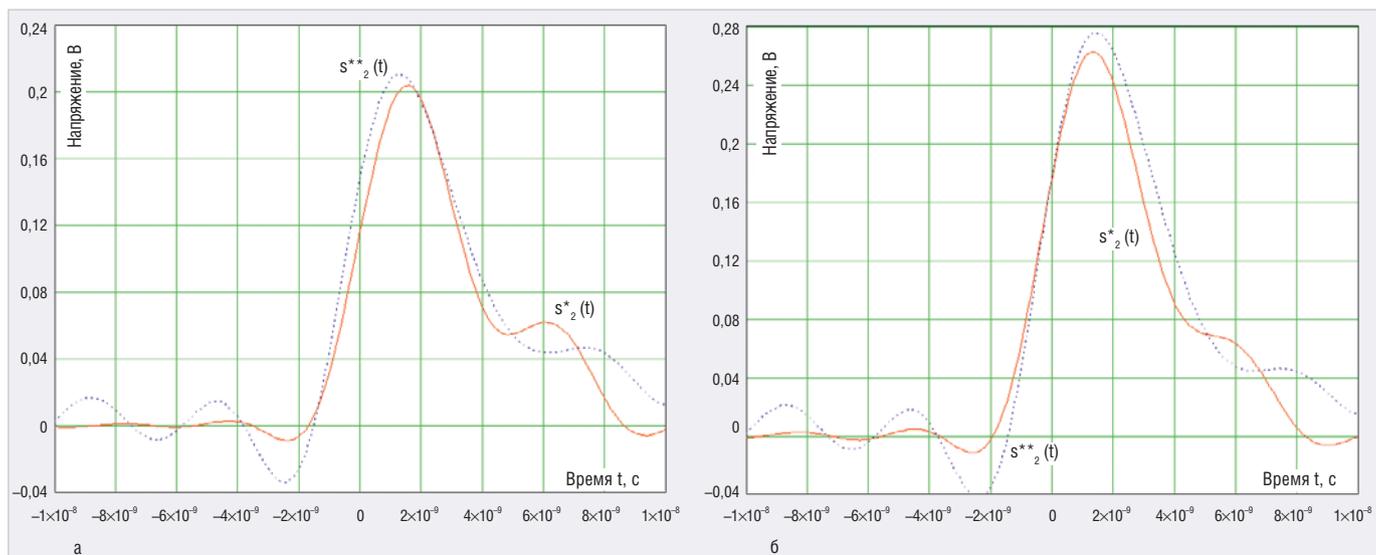


Рис. 17. Графики совмещённых функций $s^*2(t)$ и $s^{**}2(t)$ при длительности импульса 4 нс для ФВ №1 (а) и для ФВ №2 (б)

татам. Значение f_M обычно ограничено частотами в сотни мегагерц, и для измерений требуется импульс длительностью порядка 1...10 нс. Ввиду столь значительного разброса переменных расчёты по формулам (2) должны сопровождаться соответствующим допуском сходимости. Она гарантированно обеспечивается при его значении, равном $10/f_M$.

Заключение

Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного для оценки частотных свойств ФВ подхода. Наличие такой информации позволяет перейти к универсальным математическим моделям, при помощи которых можно анализировать прохождение любых сигналов в интервале частот идентификации, что

оказывается весьма полезным при проектировании технических средств и в некоторых исследовательских приложениях.

Поскольку идентификация частотных характеристик ФВ базируется на использовании результатов измерений и связана с применением широкополосных сигналов, то результаты надлежащего качества для таких расчётов могут быть получены только при условии использования высококачественных средств измерений и оснастки. При этом сигналы должны оказывать минимальное влияние на результаты измерений, т.е. иметь достаточный запас по полосе частот, чувствительности и другим важнейшим характеристикам. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют приборы профессио-

нального уровня, которые были упомянуты ранее.

Литература

13. Горелкин М., Лемешко Н., Струнин П. Расчёт собственного импеданса ферритовых втулок в составе электрических цепей на основе измерений во временной области. Часть 1. Современная электроника. 2020. № 8. С. 56.
14. Кечиев Л. Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М. Грифон. 2017. С. 424.
15. Крутичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. Т. 1. М. Мир. 1976. С. 353.
16. Clamp Filters (Ferrite Core with Case) for cable. ZCAT series. 2013. P. 13.
17. STAR-BUENO Snap Ferrite with optical closing control mechanism. Order 742275813. URL: www.we-online.com.





Простой выбор источника питания

Компания XP Power предлагает широкий ряд стандартных и конфигурируемых устройств электропитания AC/DC и DC/DC. Источники питания сочетают подтверждённую надёжность с габаритами и ценой, соответствующими практически любому требованию.



Источники питания открытого типа

- от 5 до 350 Вт
- Компактная конструкция
- Сертифицированы для медицинского и ИТ-оборудования



Конфигурируемые источники питания

- от 25 до 5000 Вт
- Высокоэффективная конструкция
- Работа от одно- и трёхфазной сети
- Сертифицированы для медицинского и ИТ-оборудования



Для монтажа на DIN-рейку

- от 5 до 960 Вт
- Сверхкомпактные
- AC/DC- и DC/DC-преобразователи



Корпусированные источники питания

- от 25 до 5000 Вт
- Высокоэффективная конструкция
- Сертифицированы для медицинского и ИТ-оборудования



DC/DC-преобразователи

- от 0,25 до 750 Вт
- Монтаж в отверстия печатной платы и поверхностный монтаж
- Для железнодорожного и медицинского оборудования



Высоковольтные источники питания

- До 500 кВ и 200 кВт
- Конструкция модульного типа и для монтажа в стойку
- Входное напряжение переменное и постоянное

