Официальный сайт ЗАО "ФЕНИКС-88"
fenix88.com

Влияние высокочастотных перенапряжений на трансформаторы тока

А. Г. Овсянников, А. А. Цариковский

Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» - Новосибирская СПБ электросетьсервиса
ул. Кленовая 10/1, Электросетьсервис, Новосибирск, 630126, Россия
E-mail: oag@ess.siberia.net

Введение

Измерительный трансформатор тока – один из самых широко используемых типов оборудования в энергетике. Трансформаторы тока сверхвысокого напряжения имеют фарфоровое покрытие и внутреннюю бумажно-масляную изоляцию конденсаторного типа. Некоторые из них имеют недостаточно высокую надежность. Основной причиной отказов является пробой внутренней изоляции [1]. В свою очередь, причины пробоя могут быть различны: производственные дефекты, увлажнение, старение под действием частичных разрядов, действие токов короткого замыкания и т.д. Но действие высокочастотных перенапряжений - одна от главных причин, ускоряющих процесс старения изоляции. Они появляются при коммутациях разъединителей и могут достигать высоких кратностей. Кроме того, они сопровождаются большими емкостными токами, протекающими через изоляцию. Эти процессы ведут к существенным диэлектрическим потерям в изоляции, к дополнительным динамическим нагрузкам и к нагреву контактных соединений. Известно, что электрическая прочность бумажно-масляной изоляции снижается в несколько раз при увеличении частоты воздействующего напряжения с 50 Гц до 100 кГц. Частотный диапазон перенапряжения при работе разъединителей может достигать сотен килогерц.

На подстанции «Итатская-1150/500 кВ» имели место неоднократные случаи выхода из строя трансформаторов тока (ТТ) типа ТФРМ-500 в результате электрического пробоя изоляции. После частичной замены трансформаторов тока ТФРМ-500 на трансформаторы типа IMB-550 (ABB, Людвика, Швеция) в марте 2003 г. произошло аналогичное повреждение уже вновь установленного трансформатора IMB-550. Чтобы объяснить причины повреждений ТТ и разработать мероприятия для их устранения, СибНИИЭ и рядом других организаций была проведена комплексная научно-исследовательская

работа. Она включала, в частности, натурные измерения высокочастотных перенапряжений и токов, появляющиеся во время работы разъединителей. В результате экспериментов было установлено, что перенапряжения не превышали 1,3 амплитуды рабочего напряжения. Однако, очень крутой фронт перенапряжений (до 1 МВ/мкс) приводил к большим токам (1300 А) и возникновению внутреннего резонанса напряжений. Измерение частотных характеристик подтвердило существование резонанса напряжений на частоте 2 МГц. Появление резонанса напряжение – следствие обмена энергией между проходной индуктивностью первичной обмотки и ёмкостью изоляции. Вычисления показали, что при резонансе напряжение, приложенное к внутренней изоляции, превышает внешнее напряжение в 1,3 раза.

Объект и методика измерений

Внешний вид ТТ типа IMB 550 и эскиз витка первичной обмоткиand показаны на рис. 1.

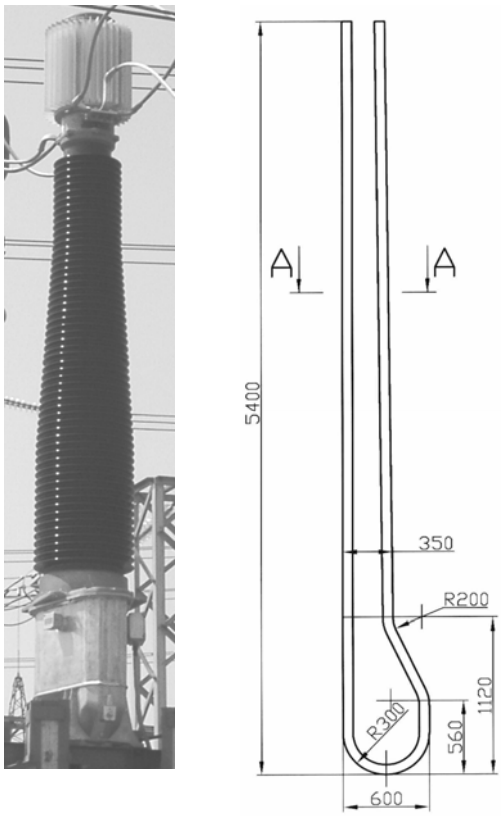

Рис. 1. ТТ типа IMB 550 и его первичная обмотка

Трансформатор имеет баковую конструкцию с первичной обмоткой U - образной форы. Изоляция конденсаторного типа этой обмотки выполнена из высокопрочной бумаги. Внутренняя полость трансформатора заполнена очи-

щенным кварцевым песком (приблизительно 60 % полного объема) и залита дегазированным минеральным маслом, соответствующим II классу по МЭК 296. Расширительная система компенсации давления выполнена в виде сильфонов, изготовленных из нержавеющей стали. Вторичные обмотки находятся в алюминиевом баке, служащим основанием трансформатора.

Регистрация высокочастотных перенапряжений и токов выполнена на ОРУ 500 кВ. В соответствии с логикой переключения самые большие высокочастотные перенапряжения ожидались при выключении шинных разъединителей. Поэтому все измерения были выполнены на трех трансформаторах, включенных между шинным разъединителем и выключателем одной фазы. Схема измерений показана на рис. 2.

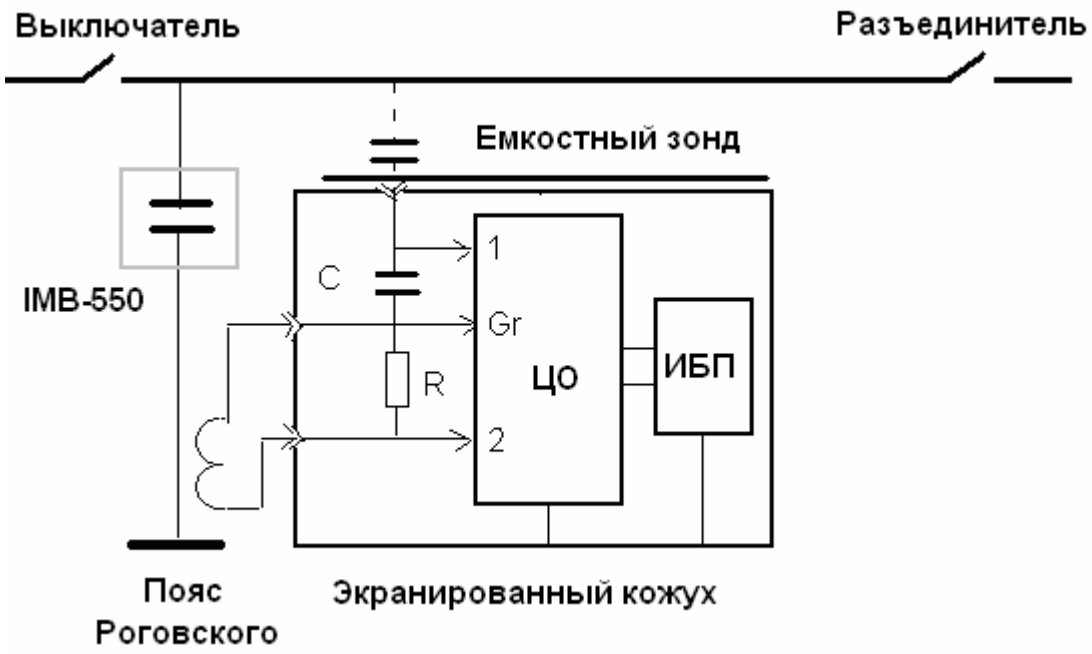

Рис. 2. Электрическая схема измерений

Датчик напряжения был выполнен в качестве емкостного зонда. Роль высоковольтного плеча играла ёмкость воздушного промежутка между шиной и проводящей пластиной. Ёмкость низковольтного конденсатора составляла 0,2 мкФ. Коэффициент деления был определён по амплитуде рабочего напряжения на шинах (см. рис. 3). Он составил $K_U = 3{,}15 \cdot 10^6$. Сигнал напряжения измерялся каналом «1» цифрового осциллографа (ЦО) “Tektronix TDS 200”. На канал «2» подавался сигнал тока. Он снимался с вторичной обмотки импульсного трансформатора тока, выполненного в виде экранированного пояса Роговского. Его первичная обмотка была включена в цепь заземляю-

щего спуска трансформатора. Коэффициент преобразования определялся при градуировке на месте измерения и составлял 1,2 мВ/А.

Цифровой осциллограф и источник бесперебойного питания (ИБП) были установлены в экранированном закрытом кожухе, который закреплялся к раме на уровне дна трансформатора и был заземлен там же.

Результаты измерений

Переходные процессы при отключении выключателя. Во время расхождения контактов выключателя уровень запуска развертки выставлялся на + 140 мВ, что соответствовало 1,05 $U_{фм}$, где $U_{фм}$ –амплитуда рабочего напряжения. На синусоидальной кривой напряжения были зафиксированы три наложенных импульса (рис. 3). Два импульса имели амплитуду около 90 кВ и различную полярность, еще один импульс между ними имел амплитуду 150 кВ. По-видимому, все эти короткие импульсы были связаны с процессами гашения и обрыва тока дуги или попытками повторного ее зажигания в камерах выключателя.

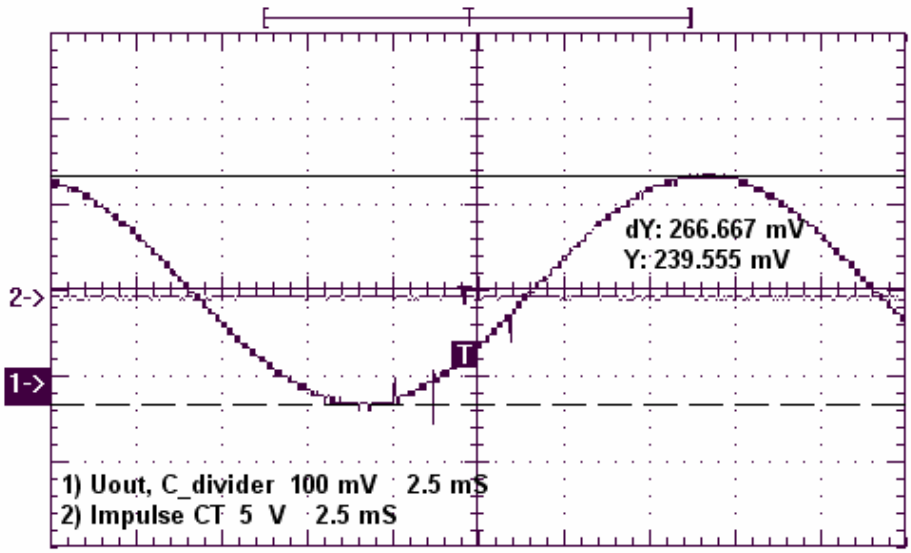

Рис. 3. Кривая напряжения (1) в момент работы выключателя

Переходные процессы при работе шинного разъединителя. В первом эксперименте были произведены 2 включения и 2 отключения разъединителей в однофазном режиме. Третье отключение было выполнено в трехфазном режиме. Для всех коммутаций разъединителей уровень запуска развертки составлял +140 мВ. Режим развертки устанавливался в положение «нормальный» в режиме отключения разъединителей и «однократный», при

включении разъединителей. Это было сделано для регистрации максимальных значений перенапряжений и токов. В режиме отключения разъединителя, осциллограф запускался от последних пробоев межконтактного промежутка, а в режиме включения – от первого пробоя. Развертка осциллографа менялась от одного опыта к другому. При первом отключении использовалась развертка 2,5 мс/дел. На осциллограмме напряжения (рис. 4) наблюдалась «классическая» картина перезарядки емкости шин и ТТ при искровых пробоях и сохранения заряда во время паузы между пробоями.

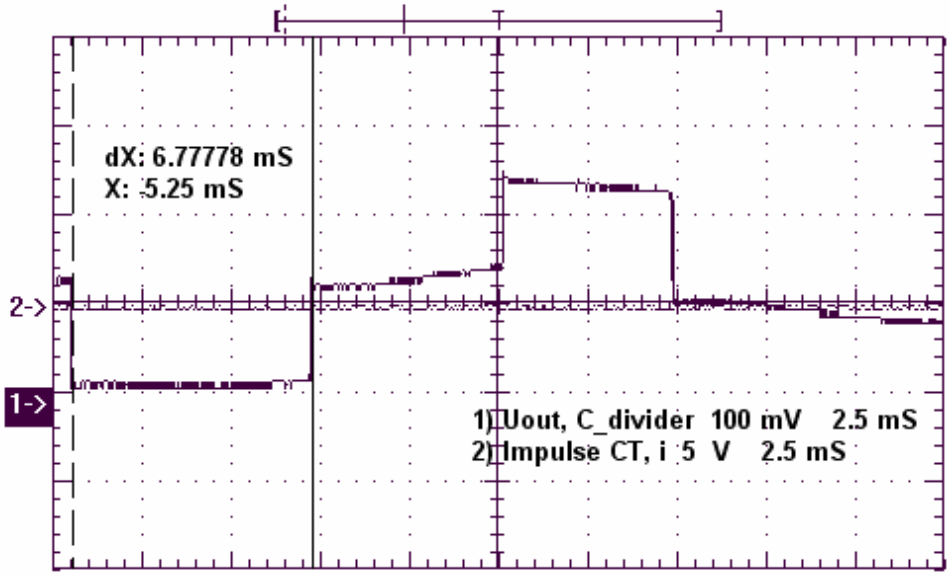

Рис. 4. Осциллограмма напряжения (1) при отключении разъединителя в однофазном режиме

Первая пауза отмечена в осциллограмме курсорами и составляет ΔT_1= 6,8 мс; вторая, ΔT_2 = 5,4 мс; третья, ΔT_3 = 4,8 мс и четвёртая, не меньше (т.к. конец паузы не вошёл в пределы осциллограммы) ΔT_4 = 7,6 мс. Ступени напряжения имели следующие амплитуды: первая, ΔU_1 = - 364 кВ; вторая, ΔU_2 = + 364 кВ; третья, ΔU_3 = + 308 кВ и четвёртая, максимальная, ΔU_4 = - 482 кВ, что соответствует, приближённо, величине 1.15 $U_{фм}$. Максимальный полный разброс напряжения между ступенями за время регистрации (25 мс) составлял 1,72 $U_{фм}$. Временные волновые характеристики хорошо видны в осциллограмме с высокой скоростью развертки (рис. 5).

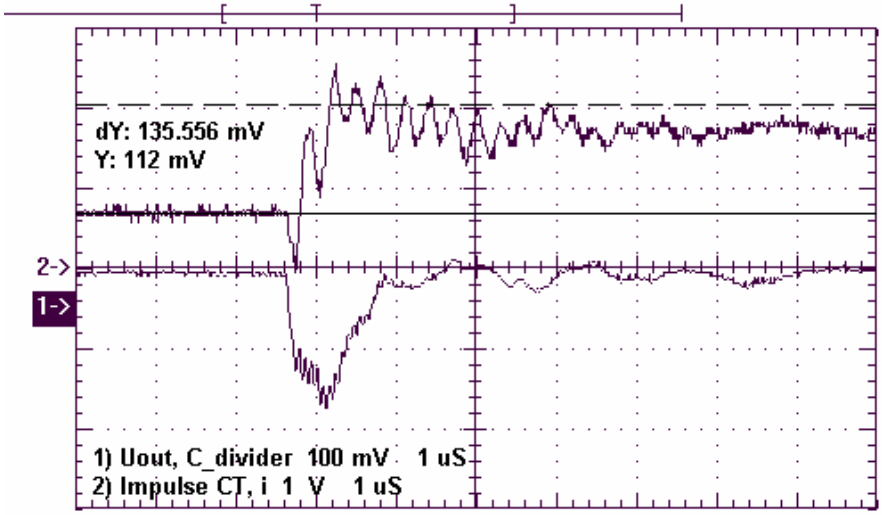

Рис. 5. Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) во время отключения разъединителей трёх фаз (полярность сигнала тока - обратная)

Длительность фронта ступени напряжения была приблизительно $T_{фр}$ = 0,5 мкс. Ток в начале импульса нарастал со скоростью $\Delta i/\Delta t$ = 7,6 кА/мкс, а затем она снижалась до 1,1 кА/мкс. Амплитуда тока достигала 1200 А.

Эксперименты были проведены еще в двух ячейках ОРУ. Все полученные экспериментальные данные сведены в таблицу.

Параметр	**Величина**
Амплитуда напряжения, кВ	270 ÷ 450
Величина перенапряжений относительно $U_{фм}$	0,75÷ 1,3
Время подъёма волны напряжения, мкс	0,4 ÷ 0,6
Время между шагами напряжения, мс	3,6 ÷ 12,6
Амплитуда добавленных колебаний, кВ	< 50
Частота колебания после импульса, кГц	500 ÷ 700
Амплитуда тока, А	1100 ÷ 1300

Исследования переходных и частотных характеристик

Для более детального понимания процессов на одном из ТТ были проведены измерения переходных и частотных характеристик. Эксперименты были сделаны в схеме, приведенной на рис. 6.

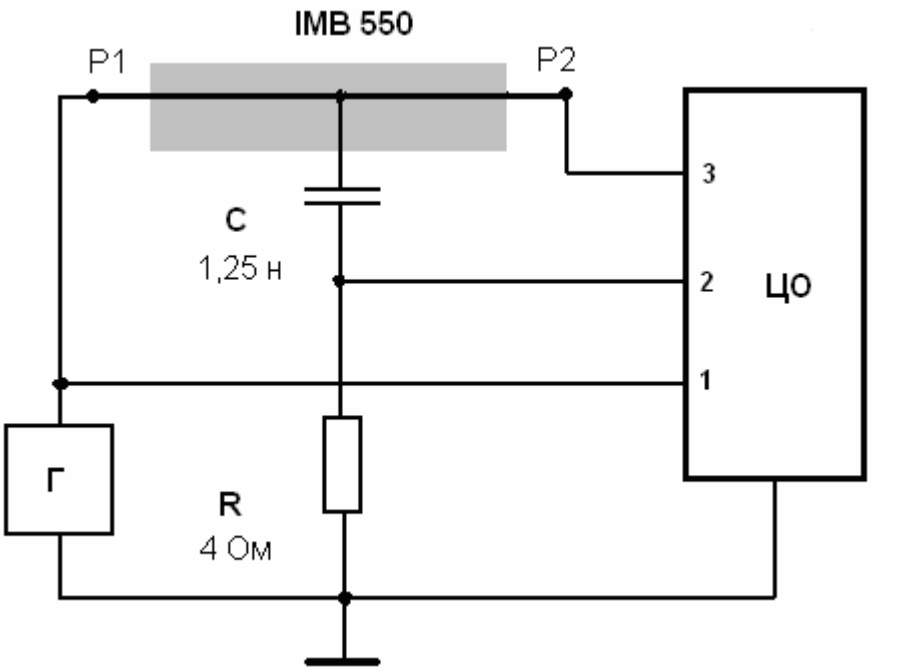

Рис. 6. Схема для измерения частоты и переходных характеристик: Г - генератор напряжения; ЦО – цифровой осциллограф; R - шунт; P1, P2 - вход и выход первичной обмотки ТТ.

Измерения были выполнены с оборудованием, установленным на уровне выводов первичной обмотки. В качестве источника синусоидального и импульсного напряжения использовался универсальный генератор Г3-112 с внутренним сопротивлением 50 Ом. Генератор присоединялся к выводу P1 первичной обмотки.

Для измерений использовался цифровой 4-х канальный осциллограф TDS 220. Входной и выходной сигналы снимались с первичной обмотки 1-м и 3-м каналами. На второй канал поступал сигнал с шунта тока (сопротивление 4 Ом). Шунт был включен между баком и заземляющей медной полосой. Токовый сигнал передавался коаксиальным кабелем, нагруженным на согласующий резистор 50 Ом. Все выводы вторичных обмоток ТТ были закорочены, а вывод предпоследней обкладки был соединен с баком.

Переходные характеристики. Были выполнены несколько опытов, в которых выход P2 первичной обмотки был нагружен на сопротивления разной величины. В результате, были определены параметры первичной обмотки:

- ёмкость изоляции – 1250 пФ;
- индуктивность – 4,9 мкГн;
- проходная ёмкость – 36 пФ;
- время распространения сигнала по первичной обмотке – 30 нс.

На рис. 7 приведены осциллограммы переходного процесса при нагружении первичной обмотки на сопротивление 300 Ом, что, приблизительно, соответствует волновому сопротивлению шин.

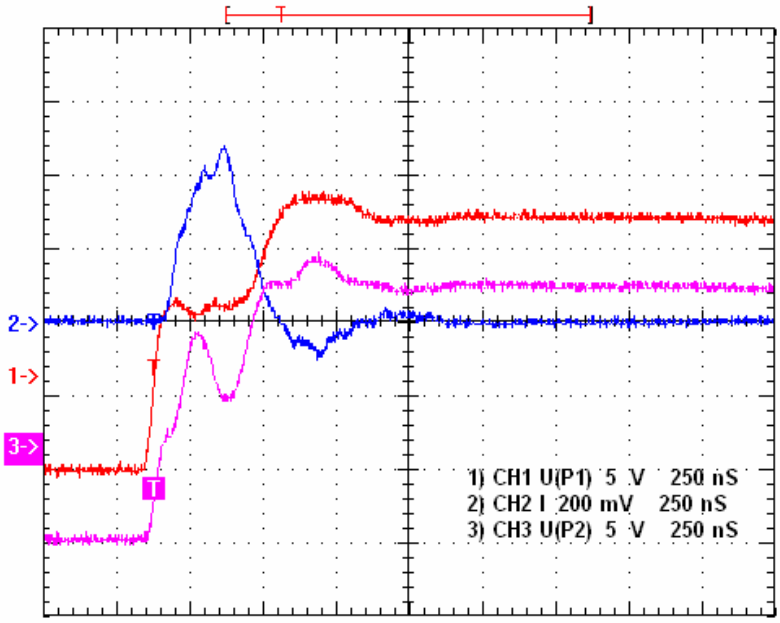

Рис. 7. Осциллограммы переходного процесса в трансформаторе тока

Реакция первичной обмотки на прямоугольную ступеньку напряжения отображена в осциллограмме входного напряжения (кривая 1). Форма кривой напряжения на выходе (кривая 3) совпадает с входной только спустя 0,8 мкс. В осциллограмме тока (кривая 2) видны быстро затухающие колебания.

Частотные характеристики первичной обмотки были проверены в диапазоне частот 0,2 – 4 МГц. На рис. 8 приведена зависимость модуля входного сопротивления от частоты. Там же приведена теоретическая зависимость. Вычисления были произведены для простейшей цепи, состоящей из последовательно соединённых резистора (4 Ом), ёмкости (1250 пФ) и индуктивности первичной обмотки (5 мкГн). Из эксперимента видно, что фактическая частота резонанса (1,4 МГц) меньше расчётной (2 МГц). Это связано с индуктивностью заземляющей шины. Она была выполнена из широкой медной полосы. Несмотря на это, её индуктивность оказалась приблизительно равной индуктивности первичной обмотки, т.е., 5 мкГн. Поэтому полная индуктивность схемы была около 10 мкГн, что привело к снижению резонансной частоты до 1.4 МГц.

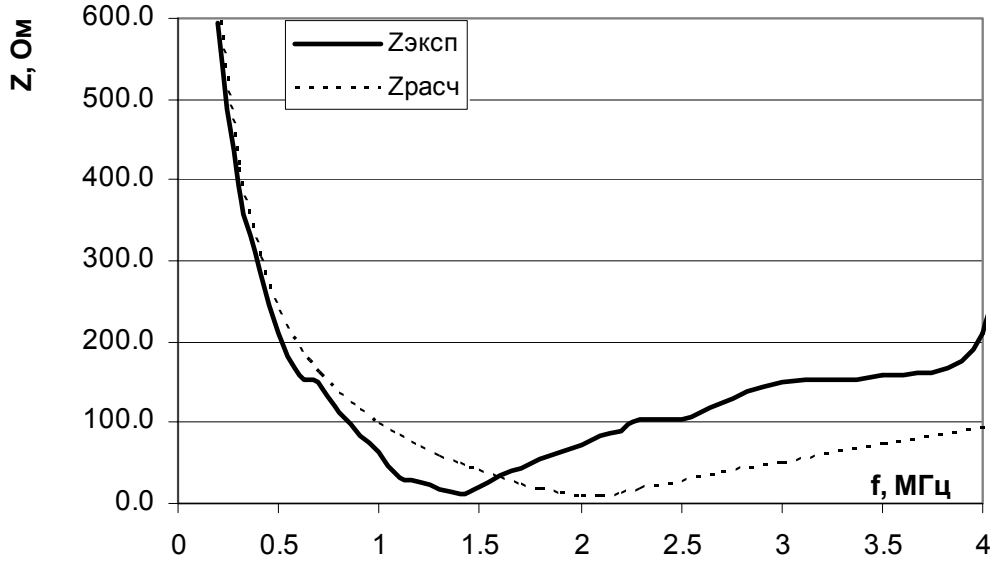

Рис. 8. Зависимость модуля входного сопротивления первичной обмотки от частоты

На рис. 9 приведена зависимость коэффициента передачи первичной обмотки, т.е. отношение напряжения на выходе обмотки в напряжению на входе. Видно, что коэффициент передачи также претерпевает большие изменения на резонансной частоте.

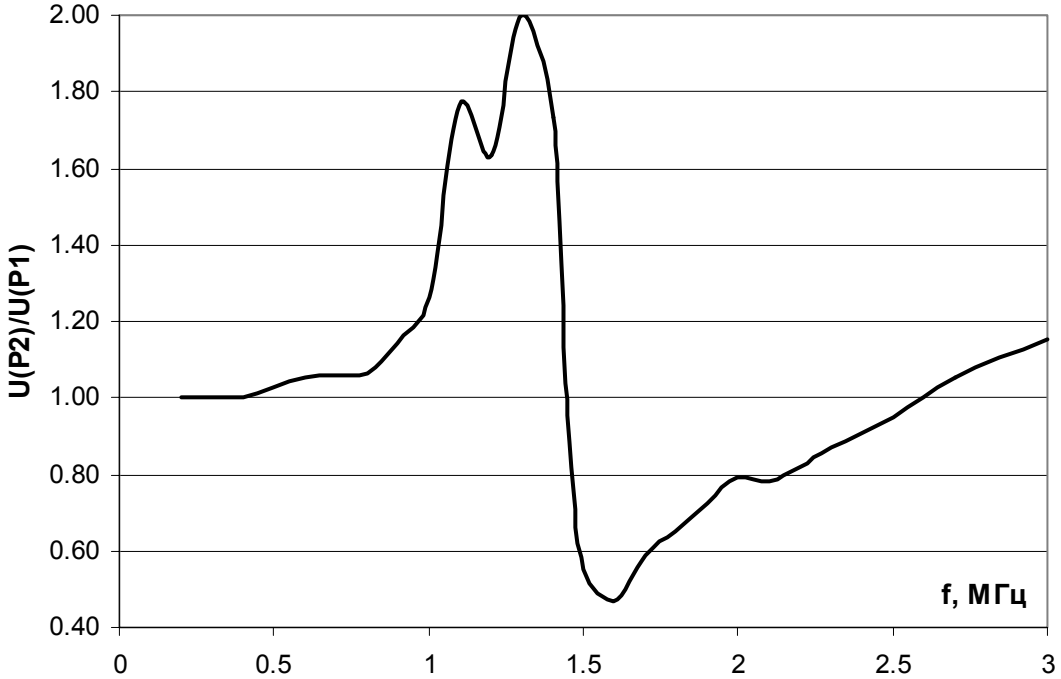

Рис. 9. Зависимость коэффициента передачи первичной обмотки от частоты

Более детальные вычисления были выполнены на эквивалентной схеме замещения (рис. 10) с помощью среды «PSpice».

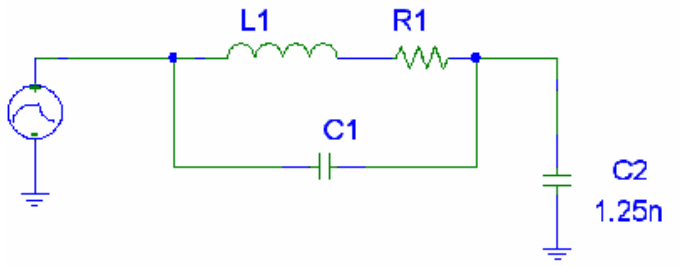

Рис. 10. Расчетная схема первичной обмотки ТТ: L1- индуктивность, C1 – паразитная ёмкость, C2 – ёмкость на землю; R1- сопротивление

В расчетах было исследовано действие ступени напряжения с амплитудой $U_{фм} = 525 \cdot \sqrt{2/3} = 428{,}7$ кВ с длительностью фронта 0.6 мкс. Расчетные осциллограммы приведены на рис. 11. Из них видно, что напряжение на внутренней изоляции достигает 550 кВ или 1,28 $U_{ф.м.}$.

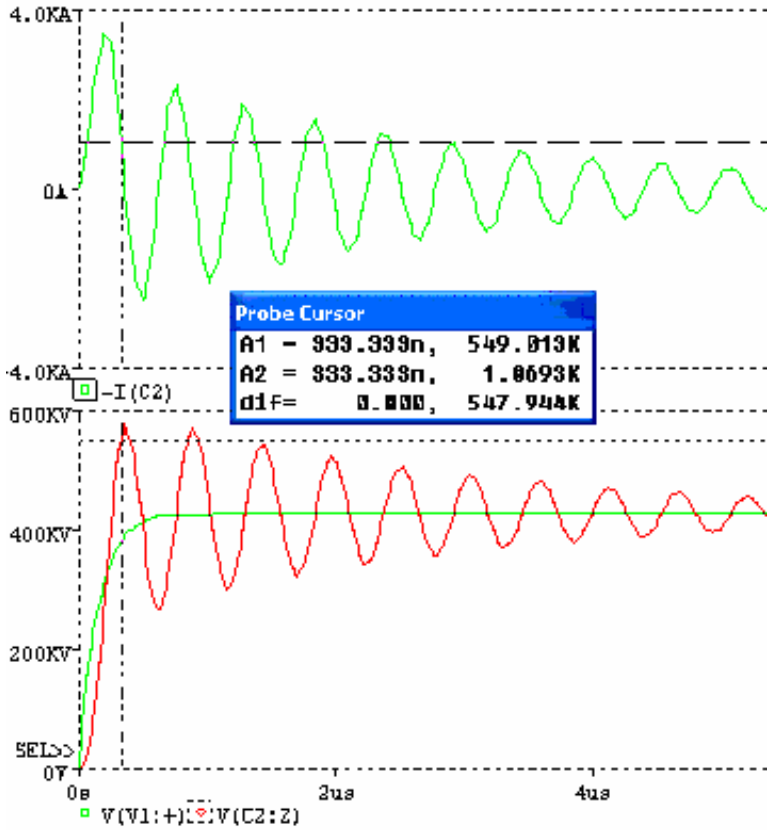

Рис. 11. Переходные процессы: (R3:1) – внешнее напряжение; V(.V1:+) – внутреннее напряжение; I(C2) - ток

Выводы

Индуктивность первичной обмотки трансформатора тока IMB 550 достаточно высока из-за большой длины витка. В свою очередь, это приводит к возникновению внутреннего резонанса напряжения на относительно низкой частоте. По-видимому, возникновение внутреннего резонанса напряжений - первый случай в трансформаторах тока. Это может быть очень опасно для изоляции, поскольку напряжение на изоляции может значительно превышать внешнее напряжение, а электрическая прочность изоляции резко снижается на высоких частотах.

Литература

[1] R.J. Schwabe, B. Whitcomb, S. Zelingher, J. Sopata, B.K. Gupta, N. Fugimoto, G.L. Ford. “On-line Diagnostics of Oil Paper Insulated Instrument Transformers” *CIGRE Session 2000*, Paper 12/33-03, 2000.