

УДК621.314.224.8

Исследование резонансных перенапряжений в измерительном трансформаторе тока ИМВ-550*

И.А. ФОМИНА¹, А.Г. ОВСЯННИКОВ², С.С. ШЕВЧЕНКО³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент. E-mail: fomina.tvn@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: oag@nsph.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель. E-mail: stas@power.nstu.ru

К настоящему времени накоплена немалая статистика отказов как силового, так и измерительного трансформаторного оборудования по неизвестным причинам. В данной статье рассматривается одна из возможных причин аварий, происходящих с трансформаторами тока класса напряжения 330...500 кВ типа ИМВ.

На ПС «Итатская-1150 кВ» в ОРУ 500 кВ были проведены измерения высокочастотных процессов, возникающих в момент коммутаций выключателями и разъединителями. Приведены характерные осциллограммы напряжения и тока, протекающего через изоляцию трансформатора тока. Анализ амплитудно-частотного спектра данных осциллограмм показал наличие компонент с частотами в диапазоне 1,8...1,9 МГц, которые не могут быть объяснены коммутационными процессами.

Дополнительно были проведены экспериментальные исследования переходных характеристик трансформатора тока ИМВ-550 в лабораторных условиях. При воздействии прямоугольного импульса на обмотку трансформатора тока получена резонансная частота величиной 1,4 МГц. Снижение резонансной частоты связано с индуктивностью заземляющей шины, которая использовалась в эксперименте. Определены параметры первичной обмотки трансформатора. Расчетная оценка резонансной частоты дает величину 2 МГц.

Исходя из проведенных экспериментов можно утверждать о возбуждении резонанса напряжений внутри трансформатора тока ИМВ-550, вызванного коммутационными процессами на подстанции. Это, в свою очередь, может быть причиной возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: трансформатор тока, ИМВ-550, первичная обмотка, коммутация, высокочастотные перенапряжения, переходной процесс, резонанс, спектральный анализ, вейвлет-анализ, измерения

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-193-204

* Статья получена 01 декабря 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

Измерительный трансформатор тока (ТТ) – это самый распространенный тип оборудования на подстанциях. Их доля поставок из-за рубежа является доминирующей. Но, к сожалению, это не самое надежное оборудование. И первые партии импортных ТТ также высокую надежность не показали. Дефекты ТТ трудно диагностируются, а развиваться они могут достаточно быстро. Основные методы предотвращения аварий заключаются в непрерывном мониторинге состояния изоляции.

Предыстория данного исследования такова. В конце 2002 – начале 2003 года на подстанции «Итатская-1150 кВ» было установлено 33 фазы ТТ типа ИМВ-550 шведской фирмы «АВВ». Уже в марте взорвался первый ТТ. В связи с этим монтаж остальных трансформаторов приостановили. Была проведена диагностика установленных ТТ, и только 12 из 33 были признаны исправными. Взрыв ТТ послужил причиной недоотпуска электроэнергии. Это, в свою очередь, привело к экономическому ущербу.

Главным фактором повреждения ТТ на ПС «Итатская» было названо механическое повреждение сильфонов системы компенсации температурного расширения масла. После устранения заводом данного дефекта аварии на данной подстанции прекратились [1].

Но при этом аварии с таким видом ТТ продолжают происходить на других подстанциях, в том числе и с трансформаторами класса 330 кВ. В большинстве случаев причины аварий так и не установлены. В итоге череды повреждений ТТ серии ИМВ руководство ОАО «ФСК ЕЭС» приняло решение об исключении применения данного типа ТТ в проектах нового строительства и реконструкции своих объектов.

Помимо вышеуказанной существуют и другие причины возникновения аварий с данными ТТ. Например, такие как высокочастотные перенапряжения, которые возникают в результате коммутации разъединителей и вызывают внутренние резонансные процессы [2–4].

К настоящему времени накопилось немало фактов отказов трансформаторного оборудования, в том числе силовых и измерительных трансформаторов тока, а также вводов высокого напряжения с внутренними высокочастотными перенапряжениями и токами, которые возникают в сети или внутри оборудования при коммутациях выключателями, особенно вакуумными и элегазовыми [5–11], и разъединителями [12, 13].

Наиболее высокие частоты переходных процессов имеют место в элегазовых комплектных распределительных устройствах (КРУЭ) [14–19]. В некоторых случаях внешние воздействия также приводят к возникновению резонансных повышений напряжения в отдельных участках схемы энергообъекта. Способы ограничения перенапряжений и подавления высокочастотных переходных процессов приведены в [12, 17, 20–23].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ ПРИ КОММУТАЦИЯХ РАЗЪЕДИНИТЕЛЯМИ ЯЧЕЕК С ТТ

Регистрация ВЧ перенапряжений и токов, протекающих через изоляцию ТТ в момент коммутации выключателями и разъединителями, проводилась при плановом выводе в ремонт автотрансформатора на ОРУ-500 кВ ПС

«Итатская-1150 кВ». Наиболее неблагоприятный режим с точки зрения перенапряжений, воздействующих на ТТ, реализуется при коммутации шинного разъединителя. Осциллограммы напряжения на обмотке ТТ и тока в цепи заземления последней обкладки при коммутации разъединителя 500 кВ на ПС «Итатская-1150 кВ» приведены на рис. 1. Кратность перенапряжений достигала $1,25U_{ф.м.}$, а импульсный ток в цепи заземления нулевой обкладки ТТ – 1200 А.

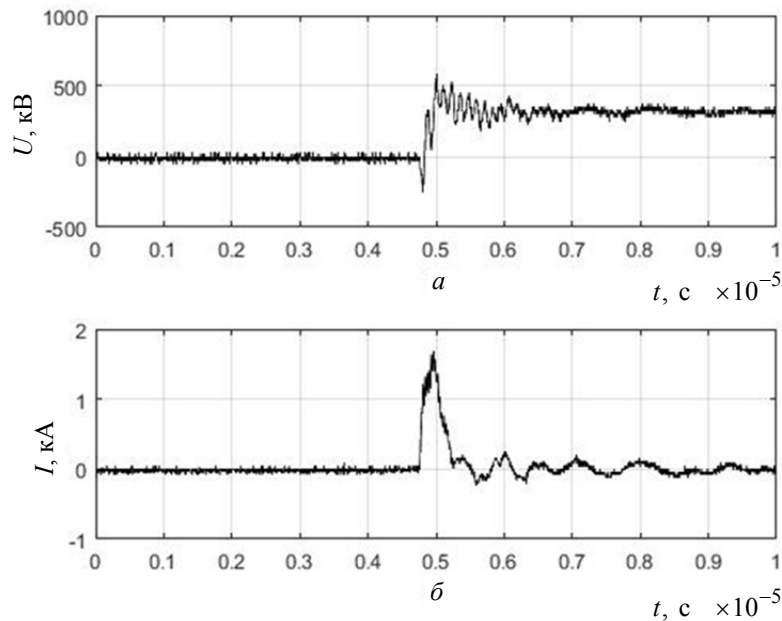


Рис. 1. Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) при коммутациях

Для выявления частот переходных процессов был проведен спектральный анализ полученных осциллограмм напряжения и тока с помощью вейвлет-преобразования.

Поскольку операция преобразования сигнала осуществляется с помощью масштабирующей переменной вейвлета, это приводит к растяжению или сжатию базового вейвлета в a раз. Следовательно, после данной операции частота центрального всплеска вейвлета также изменяется в равное число раз. Поэтому в основе алгоритма пересчета масштабирующей переменной лежит процедура определения центральной частоты вейвлета, значение которой равно частоте гармоники, наилучшим образом аппроксимирующей его центральный всплеск. Формула для определения частоты вейвлета:

$$f_a = \frac{f_c}{a \cdot \Delta t} \quad (1)$$

где f_a – псевдочастота вейвлета, Гц; Δt – шаг дискретизации; f_c – частота центрального всплеска вейвлета, Гц.

Идентификация частот гармонических составляющих сводится к определению значения масштабирующей переменной вейвлета, соответствующе-

го локальному максимуму энергии вейвлет-спектра сигнала, а также просто-му пересчету этого значения в частоту. В нашем случае максимальная энергия прослеживается при коэффициентах $a = 145$ и $a = 24$ (рис. 2), что в переводе дает нам частоты 1,8 МГц и 8,4 МГц соответственно.

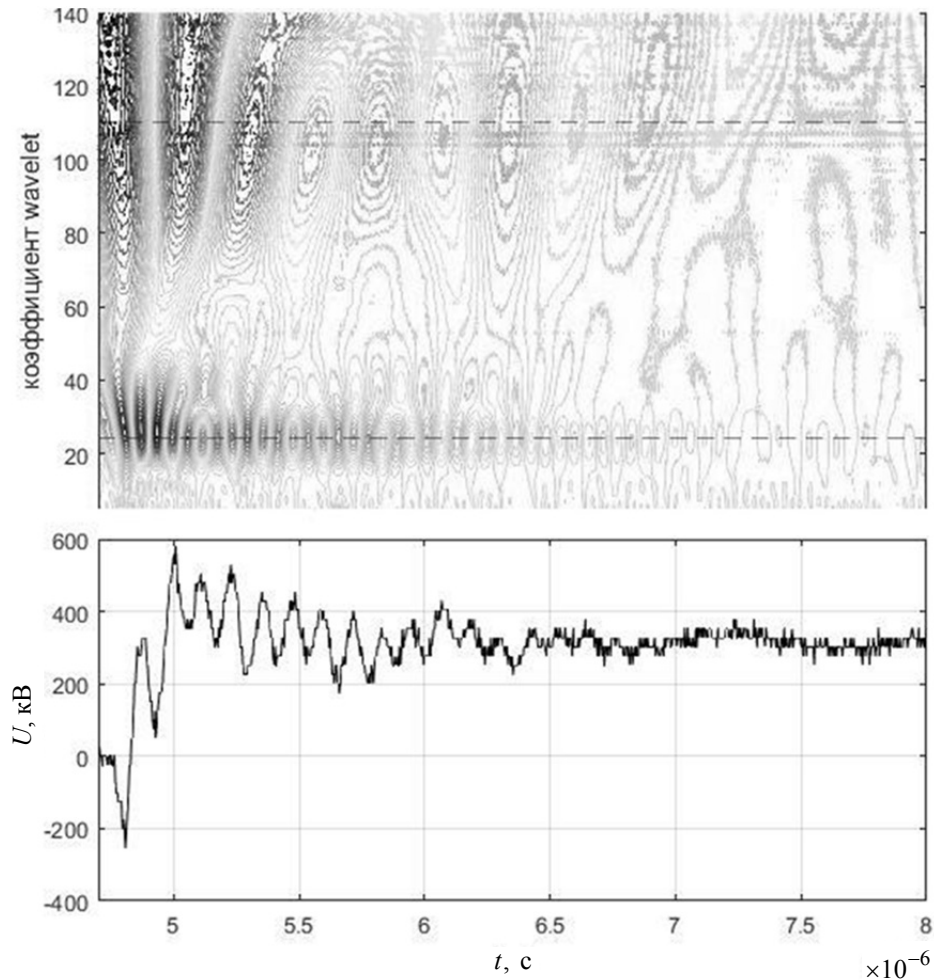


Рис. 2. Осциллограмма напряжения и ее частотно-временное представление при коммутации

Предположим, что частота 8,4 МГц связана с какими-то процессами в выключателе ВНВ-500, который «раскачивает» контур «эквивалентная емкость выключателя – ТТ – индуктивность шины между ними». При отключенном положении ВНВ-500 моделируется емкостью 1400 пФ. Выключатель имеет четыре разрыва, поэтому $C = 1400 : 4 = 350$ пФ. Емкость ТТ ≈ 1250 пФ. Их последовательное соединение дает $C_{\text{эkv}} \approx 270$ пФ. При индуктивности шины (длина около двух метров) немногим более 1 мкГн получаем резонансную частоту, близкую к 8 МГц.

Колебания плохо прослеживаются в осциллограмме напряжения (рис. 1, а), поэтому был измерен ток, протекающий внутри трансформатора тока при данной коммутации разъединителя. В осциллограмме тока (рис. 1, б)

эти колебания просматриваются намного лучше. Для нахождения частот этих колебаний также провели цифровую обработку теперь уже сигнала тока. Результат представлен на рис. 3.

В данном случае максимальная энергия выделяется при коэффициентах $a = 138$, $a = 230$ (рис. 3), что в переводе дает нам частоты 1,8 МГц и 880 кГц соответственно.

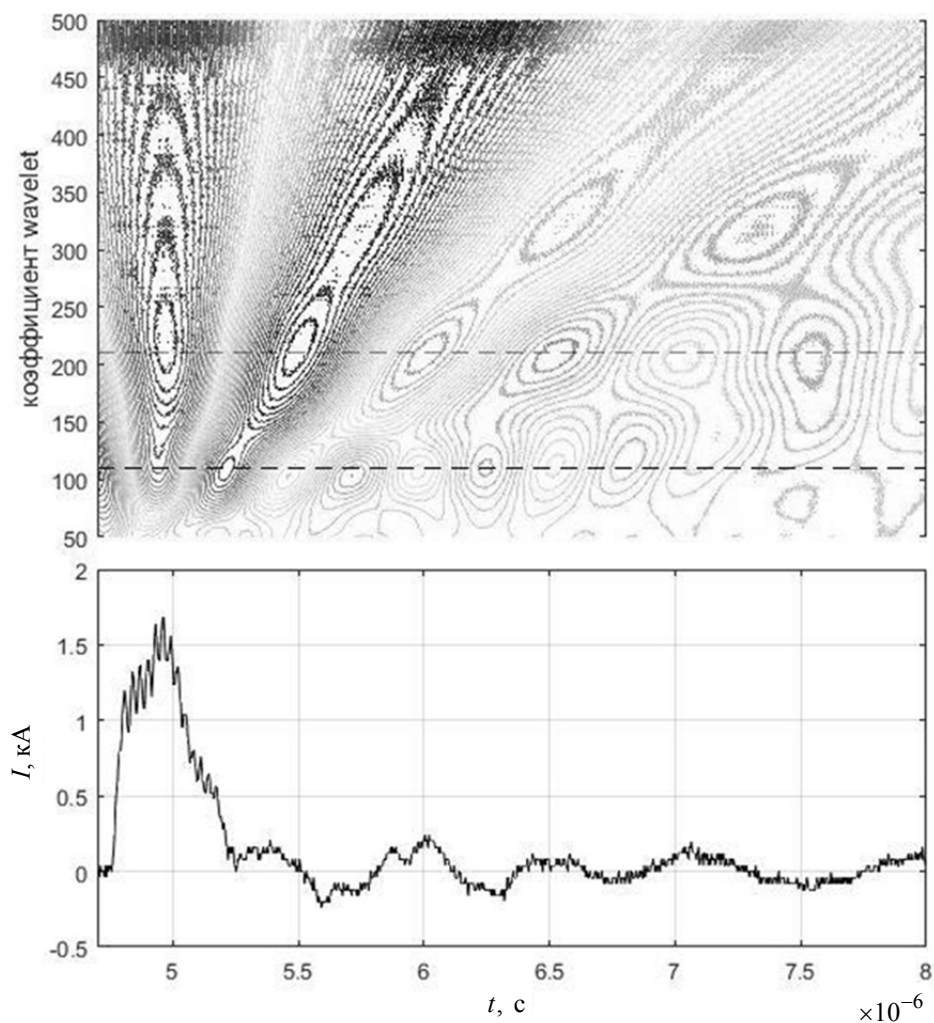


Рис. 3. Осциллограмма тока и ее частотно-временное представление при коммутации

В результате составляющая частоты 1,8...1,9 МГц содержится как в АЧХ напряжения (рис. 2), так и в АЧХ тока (рис. 3). Данная частота коммутационными процессами в данной ячейке на ПС «Итатская» не возбуждается. Поэтому можно предположить, что эта частота вызвана резонансными процессами, происходящими внутри ТТ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТТ

Для измерения переходных характеристик ТТ ИМВ 550 использовалась схема, приведенная на рис. 4. При измерении переходных характеристик в качестве источника напряжения использовался генератор ГЗ-112 с внутренним сопротивлением $R_{вн} = 50$ Ом в режиме прямоугольного импульсного напряжения. Он подключался к выводу Р1 первичной обмотки ТТ.

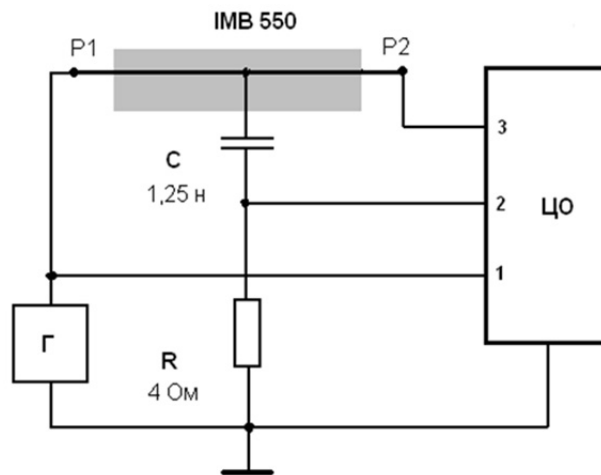


Рис. 4. Схема для измерения частоты и переходных характеристик:

Г – генератор напряжения; ЦО – цифровой осциллограф;
R – токовый шунт; P1, P2 – вход и выход первичной обмотки трансформатора тока

При измерениях на обмотку ТТ подавался прямоугольный импульс длительностью более 100 мкс и амплитудой 16,5 В (на холостом ходу). Были выполнены несколько опытов, в которых выход Р2 первичной обмотки был нагружен на сопротивление 300 Ом, что приблизительно соответствует волновому сопротивлению шин подстанции. В результате были определены параметры первичной обмотки:

- емкость изоляции 1250 пФ;
- индуктивность 4,9 мкГн;
- проходная емкость 36 пФ.

Расчетная оценка резонансной частоты (2) исходя из измеренных параметров ТТ дает величину 2 МГц:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

В результате данных опытов был измерен ток, протекающий по слоям изоляции ТТ, которую можно представить в виде распределенных емкостей вследствие воздействия на него прямоугольного импульса [24]. Как и в случае с опытными осциллограммами, полученными при измерениях на реаль-

ной подстанции, был проведен спектральный анализ данной осциллограммы тока (рис. 5).

Максимальная энергия прослеживается при коэффициенте $a = 560$, что в пересчете дает нам резонансную частоту 1,4 МГц. Из рис. 5 видно, что в спектре сигнала преобладает единственная компонента с частотой 1,4 МГц. Никакие другие компоненты в осциллограмме тока не обнаружены.

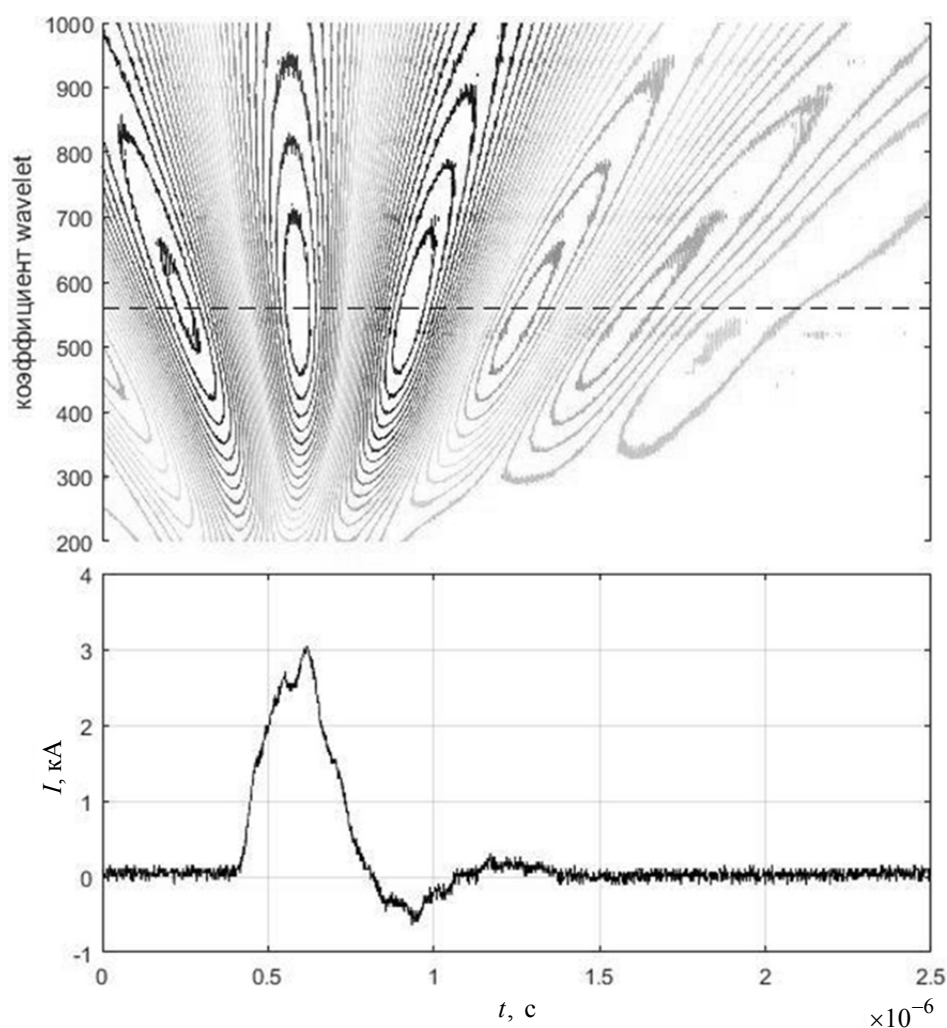


Рис. 5. Осциллограмма тока и ее частотно-временное представление при воздействии прямоугольного импульса

Частота из колебаний в кривой тока дает частоту 1,4 МГц, что меньше расчетной резонансной частоты 2 МГц. Скорее всего это связано с индуктивностью заземляющей шины, которая использовалась в эксперименте. Она оказалась приблизительно равной индуктивности первичной обмотки, т. е. 5 мкГн. Поэтому полная индуктивность схемы была около 10 мкГн, что и привело к снижению резонансной частоты до 1,4 МГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных испытаний на подстанции «Итатская-1150 кВ» было выявлено возникновение высокочастотных и относительно слабо затухающих колебаний тока с несколькими резонансными частотами – 880 кГц и 1,8 МГц. Колебания слабо выражены в осциллограмме напряжения, но отчетливо просматриваются в осциллограммах тока. Можно предположить, что эти колебания могут быть связаны с возбуждением резонанса напряжений внутри самого трансформатора тока. Дело в том, что общая длина первичной обмотки составляет почти 10 метров и, соответственно, может обладать заметной индуктивностью. Во взаимодействии с емкостью обмотки при воздействии напряжения с крутым фронтом внутри обмотки действительно могут возникнуть резонансные процессы. Из общих представлений о резонансе напряжения следует вывод о том, что эти напряжения могут превышать внешнее напряжение и вызывать ускоренное старение изоляции ТТ. В предельном случае они могут быть сопоставимы с электрической прочностью изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дарьян Л.А., Коробейников С.М. Оценка изменения внутреннего давления в высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании с герметичными сильфонами // *Электричество*. – 2008. – № 9. – С. 64–65.
2. Ovsyannikov A., Tzarikovskiy A. The influence of high frequency overvoltages on current transformers // *Proceedings of 14th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2005), Beijing, 25–29 August 2005*. – Beijing, 2005. – Paper B-41.
3. Фомина И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения и результаты химического анализа трансформаторного масла // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2010. – № 4. – С. 155–160.
4. Фомина И.А., Овсянников А.Г., Горелов С.В. Моделирование электромагнитных переходных процессов в трансформаторах тока IMB 550 // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2014. – № 1–2. – С. 246–252.
5. Florkowski M., Furgal J. Terminal based recognition of resonance overvoltages in transformer windings // *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering*. – Johannesburg, 2009. – Paper A-1.
6. Florkowski M., Furgal J., Pajak P. Analysis of transient voltage distributions in transformer windings at different insulation conditions // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2012. – Vol. 19, N 6. – P. 1991–1998.
7. Impact of surge steepness on propagation of high frequency overvoltages in transformers / M. Florkowski, J. Furgal, P. Klys, M. Kuniewski, P. Pajak // *Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering*. – Pilsen, Czech Republic, 2015. – Paper 64.
8. Internal winding failure due to resonance overvoltages in distribution transformer caused by winter lightning / M. Hori, M. Nishioka, Y. Ikeda, K. Noguchi, K. Kajimura, H. Motoyama, T. Kawamura // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2006. – Vol. 21, N 3. – P. 1600–1606.
9. Villa A. Switching overvoltage during disconnection of 765 kV reactor at substation "La Arenosa" in Venezuelan system // *Proceedings of the 43rd CIGRE Session*. – Paris, 2010. – Paper A3-209.
10. Перенапряжения при коммутациях блочного трансформатора 500 кВ элегазовым выключателем / Ю.А. Лавров, А.Г. Овсянников, С.С. Шевченко, О.Ю. Шиллер // *Электро*. – 2010. – № 6. – С. 24–27.

11. Шиллер О.Ю., Овсянников А.Г. Управляемое включение шунтирующих реакторов // Электро. – 2012. – № 4. – С. 21–25.
12. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше / РАО «ЕЭС России»; исполнители: Б.И. Ковалев, В.С. Киндяков, А.В. Ковалева, А.Г. Овсянников, В.М. Максимов. – М.: СПО ОРГРЭС, 1998. – 13 с.
13. Field measurements and modeling of high frequency transients during disconnect switch operations in EHV Substations: assessment of their effects on current transformers / M.D. del Pozo, D.A. Esteban, P. Issouribehere, G.A. Barbera, A.I. Ledesma, A. Funes // Proceedings of the 43rd CIGRE Session. – Paris, 2010. – Paper A3-207.
14. Riechert U., Krüsi U., Sologuren-Sanchez D. Very fast transient overvoltages during switching of bus-charging currents by 1100 kV disconnecter // Proceedings of the 43rd CIGRE Session. – Paris, 2010. – Paper A3-107.
15. Impact of disconnecter design on very fast transient overvoltages in gas-insulated UHV switchgear / M. Szewczyk, W. Piasecki, M. Stosur, U. Riechert, J. Kostovic // Proceedings of 17th International Symposium on High Voltage Engineering. – Hannover, Germany, 2011. – Paper B-013.
16. GIS Insulation properties in case of VFT and DC stress / CIGRÉ WG 15.03 // Proceedings of the 36th CIGRÉ Session. – Paris, France, 1996. – (CIGRÉ Report 15-201).
17. Liangeng B., Zutao X. Estimation of VFTO for GIS and HGIS of China 1000 kV UHV pilot project and its suppressing countermeasures // Proceedings of the IEC/CIGRÉ UHV Symposium, Beijing, China, 18–21 July 2007. – Beijing, 2007. – Paper 2-3-4.
18. Modelling and measurements of VFT properties of a transformer to GIS bushing / K. Johansson, U. Gäfvert, G. Eriksson, L. Johansson // Proceedings of the 43rd CIGRE Session. – Paris, 2010. – Paper A2-302.
19. Беляев С.Г., Львов Ю.Н., Радковский С.Г. Резонансные явления в высоковольтных вводах с твердой полимерной изоляцией // Электрические станции. – 2013. – № 1. – С. 44–48.
20. Mitigation of very fast transient overvoltages in gas insulated UHV substations / U. Riechert, M. Bösch, J. Smajic, A. Shoory, M. Szewczyk, W. Piasecki, S. Burow, S. Tenbohlen // Proceedings of the 44th CIGRE Session. – Paris, 2012. – Paper A3-110.
21. Коробейников С.М., Дрожжин А.П., Сарин Л.И. Скин-эффект в композиционных материалах // Электричество. – 2004. – № 7. – С. 2–9.
22. Илюшов Н.Я. Эффективное средство защиты электрооборудования от высокочастотных перенапряжений // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 4. – С. 18–24.
23. Can ferrite materials or resonant arrangements reduce the amplitudes of VFTO in GIS / S. Burow, S. Tenbohlen, W. Köhler, J. Smajic, A. Trögerand, W. Halaus // Proceedings of 17th International Symposium on High Voltage Engineering. – Hannover, Germany, 2011. – Paper B-035.
24. Лавринович А.В., Исаев Ю.Н., Елгина Г.А. Определение деформаций провода обмоток трансформатора собственным магнитным полем // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 176–179.

Фомина Ирина Александровна, ассистент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование резонансных перенапряжений в трансформаторах тока сверхвысокого напряжения. Имеет 8 публикаций. E-mail: fomina.tvn@gmail.com

Овсянников Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – физика газового разряда, диагностика электрооборудования. Имеет более 200 публикаций, в том числе 3 монографии и 4 учебных пособия. E-mail: oag@nspsb.ru

Шевченко Станислав Сергеевич, старший преподаватель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического уни-

верситета. Основное направление научных исследований – расчет электрических и магнитных полей, изучение проблем электромагнитной совместимости, проведение высоковольтных экспериментов. Имеет более 20 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: stas@power&nstu.ru

Investigation of resonance overvoltage in the IMB-550 measuring current transformer*

I.A. FOMINA¹, A.G. OVSYANNIKOV², S.S. SHEVCHENKO³

¹Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, assistant lecturer. E-mail: fomina.tvn@gmail.com

²Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: oag@nspb.ru

³Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer. E-mail: stas@power.nstu.ru

To date, considerable statistics of transformer failures in both power and measuring equipment for unknown reasons have been accumulated. This article discusses one of the possible causes of failures occurring in 330-500 kV transformers of the IMB type.

At the Itatskaya 1150 kV substation in the SWYD 500 kV, measurements of high-frequency processes that occur at the time of switching circuit breakers and disconnectors were made. Typical waveforms of voltage and current flowing through the current transformer insulation are presented. Analysis of the amplitude-frequency spectrum waveform data showed the presence of components with frequencies from 1.8 to 1.9 MHz, which cannot be explained by the commutation process.

In addition, experimental studies of transient characteristics of the IMB-550 current transformer were conducted in the laboratory. When transformer windings were exposed to a current rectangular pulse a resonant frequency of 1.4 MHz was obtained. The resonance frequency reduction was caused by the grounding bus inductance which was used in the experiment. The parameters of the transformer primary winding were found. The estimated value of the resonant frequency was 2 MHz.

Based on the experiments conducted, it can be stated that resonance voltages are induced in the IMB-550 current transformer caused by switching processes at the substation. That in turn can cause emergency situations.

Keywords: current transformer, IMB-550 transformer, primary winding, switching, high-voltage, transient, resonance, spectral analysis, wavelet analysis, measurement

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-193-204

REFERENCES

1. Dar'yan L.A., Korobeinikov S.M. Otsenka izmeneniya vnutrennego davleniya v vysokovol'tnom maslonapolnennom elektrooborudovanii s germetichnymi sil'fonami [Assessment of changes in the internal pressure of the high-voltage oil-filled electrical equipment with hermetically sealed bellows]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 9, pp. 64–65.
2. Ovsyannikov A., Tzarikovskiy A. The influence of high frequency overvoltages on current transformers. *Proceedings of 14th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2005)*, Beijing, 25–29 August 2005, paper B-41.

* Received 01 December 2016.

3. Fomina I.A. Issledovanie vozeistviya kommutatsionnykh perenapryazhenii na izmeritel'nye transformatory toka sverkhvysokogo napryazheniya i rezul'taty khimicheskogo analiza transformatornogo masla [Research of influence of switching overvoltage on measuring transformers of the current of ultrahigh voltage and results of the chemical analysis of transformer oil]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 4, pp. 155–160.

4. Fomina I.A., Ovsyannikov A.G., Gorelov S.V. Modelirovanie elektromagnitnykh perekhodnykh protsessov v transformatorakh toka ИМБ 550 [The simulation of electromagnetic transients in instrumental current transformer ИМБ 550]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2014, no. 1–2, pp. 246–252.

5. Florkowski M., Furgal J. Terminal based recognition of resonance overvoltages in transformer windings. *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering*. Johannesburg, 2009, paper A-1.

6. Florkowski M., Furgal J., Pajak P. Analysis of transient voltage distributions in transformer windings at different insulation conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, vol. 19, no. 6, pp. 1991–1998.

7. Florkowski M., Furgal J., Klys P., Kuniewski M., Pajak P. Impact of surge steepness on propagation of high frequency overvoltages in transformers. *Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilsen, Czech Republic, 2015, paper 64.

8. Hori M., Nishioka M., Ikeda Y., Noguchi K., Kajimura K., Motoyama H., Kawamura T. Internal winding failure due to resonance overvoltages in distribution transformer caused by winter lightning. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 1600–1606.

9. Villa A. Switching overvoltage during disconnection of 765 kV reactor at substation "La Arenosa" in Venezuelan system. *Proceedings of the 43rd CIGRE Session*, Paris, 2010, paper A3-209.

10. Lavrov Yu.A., Ovsyannikov A.G., Shevchenko S.S., Shiller O.Yu. Perenapryazheniya pri kommutatsiyakh blochnogo transformatora 500 kV elegazovym vyklyuchatelem [Overvoltage switching block transformer 500 kV gas-insulated switch]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2010, no. 6, pp. 24–27.

11. Shiller O.Yu., Ovsyannikov A.G. Upravlyaemoe vkluychenie shuntiruyushchikh reaktorov [Controlled switching shunt reactors]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2012, no. 4, pp. 21–25.

12. Kovalev B.I., Kindyakov B.C., Kovaleva A.V., Ovsyannikov A.G., Maksimov V.M. Metodicheskie ukazaniya po ogranicheniyu vysokochastotnykh kommutatsionnykh perenapryazhenii i zashchite ot nikh elektrotekhnicheskogo oborudovaniya v raspredelitel'nykh ustroystvakh 110 kV i vyshe [Guidelines for limiting high-frequency switching surges and protect them from the electrical equipment in the switchgear 110 kV and above]. RAO "EES Rossii", Moscow, SPO ORGRES Publ., 1998. 13 p.

13. Pozo M.D. del, Esteban D.A., Issouribehere P., Barbera G.A., Ledesma A.I., Funes A. Field measurements and modeling of high frequency transients during disconnect switch operations in EHV Substations: assessment of their effects on current transformers. *Proceedings of the 43rd CIGRE Session*, Paris, 2010, paper A3-207.

14. Riechert U., Krüsi U., Sologuren-Sanchez D. Very fast transient overvoltages during switching of bus-charging currents by 1100 kV disconnecter. *Proceedings of the 43rd CIGRE Session*, Paris, 2010, paper A3-107.

15. Szewczyk M., Piasecki W., Stosur M., Riechert U., Kostovic J. Impact of disconnecter design on very fast transient overvoltages in gas-insulated UHV switchgear. *Proceedings of 17th International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, 2011, paper B-013.

16. GIS Insulation properties in case of VFT and DC stress. CIGRÉ WG 15.03. *Proceedings of the 36th CIGRÉ Session*. CIGRÉ Report 15-201. Paris, France, 1996.

17. Liangeng B., Zutao X. Estimation of VFTO for GIS and HGIS of China 1000 kV UHV pilot project and its suppressing countermeasures. *Proceedings of the IEC/CIGRÉ UHV Symposium*, Beijing, China, 18–21 July 2007, paper 2-3-4.

18. Johansson K., Gäfvert U., Eriksson G., Johansson L. Modeling and measurements of VFT properties of a transformer to GIS bushing. *Proceedings of the 43rd CIGRE Session*, Paris, 2010, paper A2-302.
19. Belyaev S.G., L'vov Yu.N., Radkovskii S.G. Rezonansnye yavleniya v vysokovol'tnykh vvodakh s tverdoi polimernoi izolyatsiei [Resonance phenomena in high voltage bushings with solid polymeric insulation]. *Elektricheskie stantsii – Power Plants*, 2013, no. 1, pp. 44–48. (In Russian)
20. Riechert U., Bösch M., Smajic J., Shoory A., Szewczyk M., Piasecki W., Burow S., Tenbohlen S. Mitigation of very fast transient overvoltages in gas insulated UHV substations. *Proceedings of the 44th CIGRE Session*, Paris, 2012, paper A3-110.
21. Korobeinikov S.M., Drozhzhin A.P., Sarin L.I. Skin-effekt v kompozitsionnykh materialakh [The skin effect in the composite]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2004, no. 7, pp. 2–9.
22. Ilyushov N.Ya. Effektivnoe sredstvo zashchity elektrooborudovaniya ot vysokochastotnykh pe-renapryazhenii [Effective mean to protect electric equipment from high frequency over voltages]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont – Electrical equipment: maintenance and repair*, 2015, no. 4, pp. 18–24.
23. Burow S., Tenbohlen S., Köhler W., Smajic J., Trögerand A., Holaus W. Can ferrite materials or resonant arrangements reduce the amplitudes of VFTO in GIS. *Proceedings of 17th International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, 2011, paper B-035.
24. Lavrinovich A.V., Isaev Yu.N., Elgina G.A. Opredelenie deformatsii provoda obmotok transformatora sobstvennym magnitnym polem [Determination of strain wire windings of the transformer's own magnetic field]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 176–179.