

DOI: 10.18721/JEST.27304

УДК 621.311

*В.В. Колобов, М.Б. Баранник, В.В. Ивонин*Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,
г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТРОЙСТВ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЯХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В статье представлена недорогая система мониторинга состояния находящихся в эксплуатации металлооксидных ограничителей перенапряжений (ОПН). Разработанная система объединяет два метода, используемых в настоящее время для оценки состояния ограничителей перенапряжений – регистрацию разрядных токов, протекающих через ОПН под воздействием перенапряжений, и комплексный анализ тока утечки. В состав системы входит комплект датчиков – преобразователей тока проводимости с функцией регистрации импульсных токов (ПТПР) – и один измерительный блок. ПТПР измеряет величину заряда, переносимого импульсом разрядного тока, осуществляет пороговую селекцию импульсов, регистрирует дату и время. Данные регистрации сохраняются в энергонезависимой памяти. Измерительный блок системы, подключаемый последовательно к каждому ПТПР, считывает зарегистрированные данные, а также выполняет комплексный анализ тока проводимости ОПН – выделяет активную составляющую полного тока, определяет фазовый угол между приложенным к ограничителю напряжением и первой гармоникой тока проводимости, осуществляет гармонический анализ тока утечки. В качестве опорного сигнала используется напряжение одной из фаз измерительного трансформатора напряжения подстанции, поступающее по радиоканалу от передающего блока системы. Разработанная система мониторинга состояния ОПН была установлена на нескольких распределительных подстанциях. Многолетняя опытная эксплуатация системы показала, что комплексный анализ тока проводимости позволяет не только выявлять ухудшение технического состояния ОПН, но и определять причины деградации характеристик защитного аппарата. Данные регистрации разрядных токов предоставляют полезную информацию о частоте и интенсивности грозовых и коммутационных перенапряжений, возникающих на конкретном участке сети, эффективности работы ОПН и количестве энергии, поглощенной ОПН за время эксплуатации. В статье рассмотрены принцип работы, технические характеристики и аппаратная реализация предлагаемой системы. Представлены результаты опытной эксплуатации.

Ключевые слова: металлооксидные ограничители перенапряжений, диагностика, регистратор импульсов, импульсные токи, анализ тока проводимости.

Ссылка при цитировании:

Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В. Опыт эксплуатации устройств регистрации импульсных токов в нелинейных ограничителях перенапряжений // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 39–49. DOI: 10.18721/JEST.27304

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

V.V. Kolobov, M.B. Barannik, V.V. Ivonin

NERC KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia

EXPERIENCE OF OPERATING A CONDITION MONITORING SYSTEM FOR METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS

The paper presents a low-cost system for monitoring the condition of metal-oxide surge arresters (MOSAs) in service. The developed system integrates two methods currently used for evaluating the condition of surge arresters: registration of transient overvoltages experienced by a MOSA and analysis of leakage current. The system includes a set of sensors, a surge counters equipped with leakage current sensors (SCLCS), and one measuring unit. The SCLCS measures the current pulse charge, performs threshold selection of pulses, and registers the date and time. The registration data is stored in non-volatile memory. A measurement module connected successively to each SCLCS reads the registered data and also performs a comprehensive analysis of the MOSA leakage current: it identifies the resistive component of the total current; determines the phase angle between the voltage applied to the surge arrester and the first harmonic of the leakage current; performs a harmonic analysis of the leakage current. The voltage of one of the phases of a substation potential transformer is used as a reference signal, which is received via the radio channel from the transmitting unit of the system. The developed system for monitoring the condition of metal-oxide surge arresters was installed at several distribution substations. Long-term pilot operation of the system has shown that a comprehensive analysis of the leakage current allows not only to identify the deterioration of the technical condition of the MOSA, but also to determine the causes of degradation of the characteristics of the protective device. Data obtained by a SCLCS provides useful information on lightning and switching transient overvoltages arising in a particular network segment, the efficiency of the arrester operation, and the amount of energy absorbed by the MOSA. The paper describes the hardware implementation, operational principles, and main technical specifications of the proposed system. The results of the pilot testing of the system are presented.

Keywords: metal oxide surge arrester; condition monitoring; surge counter; discharge currents; the charge of surge current; leakage current analysis.

Citation:

V.V. Kolobov, M.B. Barannik, V.V. Ivonin, Experience of operating a condition monitoring system for metal-oxide surge arresters, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 39–49, DOI: 10.18721/JEST.27304

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Металлооксидные ограничители перенапряжений (ОПН) используются для защиты оборудования и функциональных компонентов подстанций и линий электропередачи от грозовых и коммутационных перенапряжений [1]. Соответственно, периодический контроль или мониторинг состояния ОПН позволяет вовремя выявить их неисправность и, тем самым, повысить надёжность функционирования энергосистемы в целом [2].

В настоящее время на высоковольтных подстанциях наиболее распространёнными методами диагностики состояния ОПН под рабочим напряжением являются: тепловизионный контроль; измерение и анализ тока проводимости; регистрация импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием грозовых и коммутационных перенапряжений [3].

Тепловизионный контроль позволяет быстро выявить ОПН с аномально нагретыми зонами, но для выяснения причин локального нагрева используются другие методы диагностики, как правило, измерение активной составляющей тока утечки.

Периодическое изменение активной составляющей тока проводимости и контроль ее изменения за время эксплуатации ОПН является эффективным и информативным методом диагностики состояния ОПН, так как он позволяет выявить ухудшение защитных свойств ОПН, обусловленных такими причинами, как: деградация вольт-амперных характеристик (ВАХ) оксидно-цинковых элементов; увлажнение внутренней поверхности корпуса ОПН вследствие его разгерметизации; загрязнение внешней поверхности корпуса ОПН [4].

Защитные характеристики современных ОПН не ухудшаются из-за длительного воздействия рабочего напряжения, а ВАХ их варисторов не деградируют из-за химических реакций с окружающей атмосферой. Деградация общей ВАХ современных типов ОПН преимущественно происходит под воздействием импульсных разрядных токов.

Для регистрации разрядных токов используются устройства, включаемые между нижним изолированным фланцем ОПН и заземляющим устройством подстанции, с различной функциональностью – от простых пороговых счетчиков импульсов, до систем мониторинга, регистрирующих форму импульсов и энергетические параметры разрядных токов.

В ЦЭС КНЦ РАН была разработана недорогая автономная и портативная система мониторинга состояния ОПН в процессе эксплуатации. Система позволяет осуществлять «онлайн» мониторинг разрядных токов с разделением импульсов по величине заряда и проводить периодический контроль активной составляющей и гармонического состава полного тока проводимости ОПН.

Структура и принцип работы системы

В состав системы диагностики состояния ОПН в процессе эксплуатации в общем случае входит несколько датчиков – преобразователей тока проводимости ОПН с функцией регистрации импульсных токов (ПТПР), и один общий измерительный блок [5]. ПТПР устанавливаются на ограничители перенапряжений подстанции и в автономном режиме регистрируют разрядные импульсы тока через ОПН, сохраняя данные регистрации в энергонезависимой памяти. Измерительный блок предназначен для считывания данных из памяти каждого ПТПР, а также для измерения активной составляющей и гармонического состава полного тока утечки ОПН с использованием трансформатора тока (ТТ2 на рис. 1), входящего в состав ПТПР, в качестве первичного датчика тока проводимости ОПН.

Первоначально ПТПР находится в «спящем» режиме, в котором функционируют только часы реального времени. При возникновении перенапряжения на ОПН и, соответственно, прохождении импульса разрядного тока через трансформатор тока 1 (ТТ1 на рис. 1), во вторичной обмотке возникает импульс тока, повторяющий форму разрядного импульса тока. Так как этот импульс может иметь разную полярность, то он подается на схему выпрямления. С выхода схемы выпрямления импульс тока положительной полярности поступает параллельно на входы двух интеграторов (ИНТ). На выходе ИНТ1 и ИНТ2 формируются постоянные напряжения, уровень которых определяется зарядом импульса тока на входе ИНТ и постоянными времени интеграторов τ_{i1} и τ_{i2} . ИНТ1 является дискриминатором порогового уровня. Если заряд импульса тока через ОПН превышает порог в 25 мкКл (такой заряд имеет грозовой импульс тока 8/20 мкс с амплитудой 1.25 А или импульс тока 30/60 мкс с амплитудой 0.45 А), то выходное напряжение ИНТ1 переводит ПТПР в режим измерения заряда импульса тока через ОПН. ИНТ2 является измерительным. Напряжение $U_{\text{ИНТ2}}$ подается на 10-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

ПТПР позволяет измерять заряд импульса тока в диапазоне 25 мкКл – 200 мКл. Кроме того устройство выполняет селекцию зарегистрированных импульсов тока, а именно, отдельно подсчитывается количество импульсов тока несущие заряд превышающим порог в 25 мКл. Такой заряд соответствует грозовому импульсу тока 8/20 мкс с амплитудой 1250 А или импульсу тока 30/60 мкс с амплитудой 450 А.

Отметим, что часы реального времени определяют время с точностью до одной секунды. Когда происходит регистрация импульса тока, текущее значение времени сохраняется в памяти. За оставшийся временной интервал до увеличения значения текущего времени на одну секунду, могут быть зарегистрированы еще несколько импульсов тока, время регистрации которых будет совпадать с первым импульсом. Поэтому для всех импульсов, зарегистрированных в пределах одной секунды, вводится обозначение «событие». За время начала «события» принимается показания часов реального времени, зафиксированные для первого импульса в «событии». При увеличении значения единиц секунд, последующие импульсы считаются относящимися к новому «событию». Подробнее определение «события» и поясняющие временные диаграммы приведены в [6].

После перехода ПТПР в «спящий» режим в памяти устройства сохраняется следующая информация о «событии»: порядковый номер «события»; дата и время «события»; общее количество

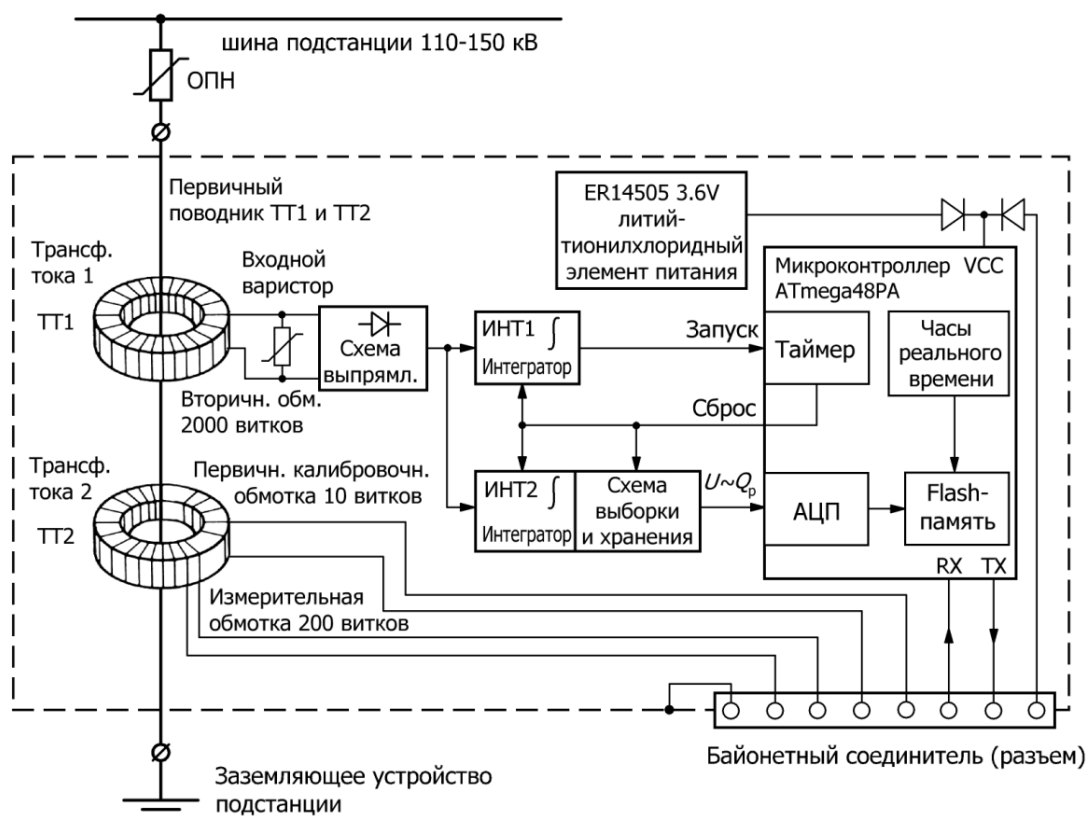


Рис. 1. Структурная схема преобразователя тока проводимости ОПН с функцией регистрации импульсных токов (ПТПР)

Fig. 1. Functional block diagram of the surge counter with integrated leakage current sensor (SCLCS)

импульсов в «событии» (для всех импульсов в «событии» $Q \geq 25$ мкКл) и количество импульсов из них, для которых $Q \geq 25$ мкКл; суммарный заряд всех импульсов тока в «событии».

Также в памяти ПТПР хранится идентификационный номер устройства и суммарная информация о зарегистрированных разрядных токах через ОПН: количество зарегистрированных «событий» за время работы ПТПР; количество разрядных импульсов тока зарегистрированных за все время; количество импульсов, для которых $Q \geq 25$ мкКл; величина суммарного заряда Q_{Σ} , перенесенного импульсами тока через ОПН за все время регистрации.

Как видно из рис. 1, большинство функциональных узлов ПТПР, таких как часы реального времени, АЦП, таймер, FLASH-память, входят в состав микроконтроллера (МК) устройства. Питание ПТПР осуществляется от литий-тионил хлоридного элемента ER14505 напряжением 3.6 В и емкостью 2400 мА·ч. Прогнозируемое время работы ПТПР от одного элемента питания составляет 8-10 лет.

Трансформаторы тока и печатная плата с электронными компонентами размещены в металлическом герметичном корпусе. Для разработанных ПТПР были использованы корпуса от датчиков тока проводимости, которыми оснащались ОПН первого поколения.

Внизу на корпусе ПТПР расположен многовыводный байонетный разъем, выводы которого соединены с выводами микроконтроллера. Также выводы разъема соединены с измерительной и калибровочной вторичными обмотками трансформатора тока, который используется как первичный датчик для измерения тока проводимости ОПН.

Для отображения хранящейся в памяти ПТПР информации используется измерительный блок системы диагностики состояния ОПН в процессе эксплуатации «СКАТ» [7]. Измерительный модуль подключается с помощью интерфейсного кабеля к разъему ПТПР и информация о результатах регистрации импульсных токов через ОПН отображается на дисплее измерительного блока. При этом МК ПТПР питается от источника питания измерительного модуля.

Рассмотрим результаты опытной эксплуатации преобразователя тока проводимости с функцией регистрации импульсов тока, проходящих через ОПН, на примере нескольких устройств, установленных на подстанциях ПС-30, ПС-112 и ПС-203А [8] в начале грозового сезона 2014 г.

На ПС-30 были установлены шесть регистраторов – на ОПН каждой фазы первой и второй системы шин 150 кВ. Установленные устройства позволяли регистрировать импульсные токи, протекающие через ОПН под воздействием грозовых и коммутационных перенапряжений, возникающих на системах шин 150 кВ ПС-30 и линиях Л-153, Л-154. Двухцепная линия Л 153/154 соединяет ПС Выходной и ПС-11А с отпайкой на ПС-30 Оленегорск.

Проанализируем результаты регистрации импульсных токов через ОПН 2-ой системы шин 150 кВ ПС-30, приведенные в табл. 1.

16 апреля регистратором зафиксированы поочередные срабатывания ОПН каждой из фаз 2-ой системы шин. ПС-30 (№ 1-3 в табл. 1). Зарегистрированные импульсные токи через ОПН объясняются перенапряжениями на Л-154, возникшими в ходе исследований, проводимых 16 апреля 2014 г. ЦЭС КНЦ РАН на ПС-11А. Целью исследований являлось получение экспериментальных данных по перенапряжениям на изоляции выключателей на подстанции ПС-11А, возникающих при отключении ненагруженной линии Л-154 под рабочим напряжением.

После обработки результатов опытов было установлено, что выключения ненагруженной линии не сопровождались вторичными пробоями в камерах выключателей а, следовательно, не возникали перенапряжения на Л-154, тогда как опыты включения приводили к возникновению перенапряжений на линии и, соответственно, на ОПН. По осциллограммам напряжений были определены точные времена подачи тока в линию и амплитуды коммутационных импульсов [9]. При коммутации в 16:58:31 максимальную амплитуду имел коммутационный импульс на фазе А, в 17:08:12 – на фазе С, в 17:24:37 – на фазе В, что приводило к срабатыванию ОПН соответствующей фазы (№ 1-3 в табл. 1). Кроме того, эти коммутационные перенапряжения на линии Л-154 были записаны регистратором геоиндуктированных токов, установленным в нейтрали АТ 2 330/150кВ ПС Выходной [9, 10].

28 июля зафиксированы импульсы тока через ОПН фазы В и фазы А с зарядом 1.65 мКл и 0.47 мКл соответственно (№ 12-13 в табл. 1). В этот день наблюдалась грозовая активность, соответственно регистратор зафиксировал импульсные токи через ОПН от грозовых перенапряжений на линии Л-154. Это подтверждают и осциллограммы, полученные регистратором ГИТ, установленным на ПС Выходной [9]. Форма тока в нейтрали АТ-2 на осциллограммах – период промышленной частоты – свидетельствует о том, что на линии вследствие удара молнии произошло перекрытие изоляции на землю и короткое замыкание с последующим отключением линии, что подтверждается диспетчерской документацией.

Другое грозовое перенапряжение на Л-154 с последующим срабатыванием ОПН фазы А, зафиксированное 8 августа в 20:52:53 (№ 14 в табл. 1), также совпадает по времени с импульсом тока, записанным регистратором ГИТ на ПС Выходной. Форма тока показывает, что отключения линии не произошло. Это подтверждается и диспетчерской документацией.

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН первой системы шин ПС-30 (линия Л-153) приведены в табл. 2.

27 июня 2014 года зафиксированы многократные срабатывания ОПН фазы С. Эти импульсы тока объясняются процессом выхода из строя с последующим разрушением конструкции ОПН фазы С. Как выяснилось впоследствии, причиной аварии послужило попадание влаги на вну-

тренную поверхность оболочки ОПН вследствие разгерметизации конструкции (в течение всего дня 27 июня в Оленегорске наблюдались осадки в виде дождя). В период времени с 20:29:11 по 21:28:13 регистратор зафиксировал 360 «событий», позволяющих «проследить» процесс выхода ОПН из строя.

Таблица 1

**Результаты регистрации импульсных токов через ОПН
трех фаз 2^{-ой} системы шин 150 кВ ПС-30 (линия Л-154)**

Table 1

**Results of registration of pulse currents through the surge arresters
of three phases of the 2nd bus system 150 kV PS-30 (line L-154)**

№	Дата	Время	Общее число импульсов, фаза	Число имп. заряд более 25 мКл	Заряд, прошедший через ОПН (мКл)			Установленная причина импульсных токов через ОПН
					А	В	С	
1	16.04.14	16:58:31	1А		0.47	–	–	Включение выключателей на ПС-11А
2	16.04.14	17:08:12	1С		–	–	1.18	
3	16.04.14	17:24:37	1В		–	4.25	–	
4	06.05.14	06:06:44	2А, 2В, 1С		0	0	0	Коммутационные перенапряжения на 2-ой системе шин
5	06.05.14	06:12:53	2В		–	0	–	
6	06.05.14	15:26:55	2В, 1С		–	0	0	
7	28.06.14	00:22:51	79А, 120В, 56С		0	0.95	0	
8	01.07.14	17:05:52	22А, 236В, 25С		0	0.47	0	
9	08.07.14	16:20:46	25А, 23В	5В	4.73	293.0	–	
10	08.07.14	16:21:44	29А, 2В, 10С		133.2	0	37.11	
11	09.07.14	14:47:25	2В, 1С		–	0	0	
12	28.07.14	17:17:42	1В		–	1.65	–	Попадание молнии в Л-154
13	28.07.14	17:20:24	1А		0.47	–	–	
14	08.08.14	20:52:53	1А		0.24	–	–	Коммутационные перенапряжения на 2-ой системе шин
15	21.08.14	10:31:57	22А, 53В		0	0	–	
16	22.09.14	06:19:11	2А, 2В, 1С		0	0	0	
17	26.09.14	15:16:12	10А, 46В		0	0	–	
18	26.09.14	19:35:30	1В		–	0	–	
19	26.09.14	19:48:28	1В		–	0	–	

В течение всего указанного периода времени через ОПН протекали импульсные токи, вызванные не приводящими к короткому замыканию пробоями по увлажненной внутренней поверхности оболочки ОПН. В одном «событии» количество импульсов составляло от 1 до 7, а их суммарный заряд достигал 0.47 мКл. Величина заряда импульсов имела случайное распределение по времени и не увеличивалась. Интервал между «событиями» составлял от единиц до нескольких десятков секунд. Большие интервалы могут объясняться тем, что образовавшийся проводящий канал на внутренней поверхности оболочки ОПН успевал подсыхать за время серии незавершившихся разрядов. Из-за большого количества эти «события» в табл. 2 не приведены. На последней минуте (21:28) частота следования «событий» увеличилась – пробой происходили практически каждую секунду. За последнюю секунду (21:28:13) зафиксирован 21 импульс, 15 из которых имели

Таблица 2

**Результаты регистрации импульсных токов через ОПН
трех фаз 1^{-ой} системы шин 150 кВ ПС-30 (линия Л-153)**

Table 2

**Results of registration of pulse currents through the surge arresters
of three phases of the 1st bus system 150 kV PS-30 (line L-153)**

№	Дата	Время	Общее число импуль- сов, фаза	Число имп. заряд более 25 мКл	Заряд, прошедший через ОПН (мКл)			Установленная причина импульсных токов через ОПН
					А	В	С	
1	08.10.13	11:33:23	15А		0	–	–	Коммутационные перенапряжения на 2-ой системе шин
2	06.05.14	05:52:01	1А, 1В		0	0	–	
3	27.06.14	20:29:11– 21:28:13 360 событий	21С последнее событие	15С последнее событие	–	–	3606 последнее событие	Авария ОПН фазы С

Таблица 3

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН линии ОЛ-156 ПС-112

Table 3

Results of registration of pulse currents through the surge arresters of PS-156 line OL-154

№	Дата	Время	Заряд, прошедший через ОПН (мКл)			Примечание	Установленная причина импульсных токов через ОПН
			фаза А	фаза В	фаза С		
1	07.06.14	18:19	–	0	–	Откл. Л-155, АПВ-успешный	Грозовые перенапряжения
2	07.06.14	18:47	–	9.22	0		
3	07.06.14	18:51	–	2.13	–	Откл. Л-155, АПВ-успешный	
4	07.06.14	18:52	0	0	0.24		
5	07.06.14	19:02	0	–	–		
6	07.06.14	19:14	–	–	0		
7	31.07.14	21:52	1.89	0.71	0.24		
8	14.08.14	18:34	0	1.89	–	Откл. Л-155, 156 АПВ-успешный	
9	15.08.14	18:03	5.91	6.85	38.76		

заряд более 25 мКл. Суммарный заряд последнего «события» составил более 3.6 Кл (№3 в табл. 2). Далее произошло разрушение ОПН.

Комплект из трех ПТПР был установлен также на ОПН 150 кВ линии ОЛ-156 (отпайка Л-156) подстанции ПС-112. Сразу отметим, что все срабатывания ОПН идентифицированы по причине возникновения и связаны с грозовыми перенапряжениями. При анализе результатов регистрации (табл. 3) использовалась информация об отключениях линий, предоставленная диспетчерской службой (приведена в столбце «примечания» таблицы). Большое количество «собы-

тий» 7 июня 2014 г. обусловлено сильной грозой в этот день. В 18:19 зарегистрировано попадание молнии в линию Л-155 с перекрытием изоляции и отключением линии с последующим успешным АПВ. При этом наведенное напряжение на Л-156 привело к срабатыванию ОПН фазы В, но импульс тока имел малый заряд (№1 в табл. 3). В 18:47 и в 18:52 регистратор импульсов срабатывал из-за грозового перенапряжения на фазе В и фазе С, соответственно (№2, 4 в табл. 3). По величине заряда импульсов можно заключить, что попадание молнии произошло в линию Л-156. В 18:51 сработал ОПН фазы В (№3 в табл. 3), что вызвано попаданием молнии в провод этой фазы линии Л-156. При этом произошло перекрытие изоляции и отключение линии с последующим успешным АПВ.

31.07.14 в 21:52 регистратор зафиксировал токи от грозового перенапряжения на линии, причем, судя по измеренной величине заряда импульса тока, попадание молнии произошло в провод фазы А, а ОПН других фаз сработали от наведенных напряжений (№7 в табл. 3). Грозовое перенапряжение на линии не вызвало перекрытия изоляции и отключения линии.

14.08.14 зафиксировано срабатывание ОПН фаз А и В от грозового перенапряжения. Это «событие» сопровождалось отключением обеих линий Л-155, 156 с последующим успешным АПВ (№8 в табл. 3).

15.08.14 в 18:34 зарегистрированы импульсные токи через ОПН всех фаз со значительным зарядом (№9 в табл. 3). Максимальный заряд – 38.76 мКл – прошел через ОПН фазы С, что свидетельствует о попадании молнии в провод этой фазы. ОПН остальных фаз сработали от наведенных напряжений. Грозовое перенапряжение на линии не привело к перекрытию изоляции и отключению линии.

Еще один комплект ПТПР был установлен на ОПН 150 кВ линии ОЛ-114 (отпайка Л-114) подстанции ПС-203А. Результаты регистрации токов приведены в табл. 4. Все срабатывания регистратора на ПС 203А также объясняются грозовой активностью.

Таблица 4

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН линии ОЛ-114 ПС-203А

Table 4

Results of registration of pulse currents through the surge arresters of PS-203A line OL-114

№	Дата	Время	Заряд, прошедший через ОПН (мКл)			Примечание	Установленная причина импульсных токов через ОПН
			фаза А	фаза В	фаза С		
1	07.06.14	19:00	–	–	133.7	Откл. Л-114 АПВ-успешный	Грозовые перенапряжения
2	31.07.14	21:50	0	2.6	–	Откл. Л-114 АПВ-успешный	

Во время сильной грозы 7 июня в 19:00 зарегистрировано срабатывание ОПН фазы С ПС-203А со значительным зарядом импульса тока – 133.7 мКл (№3 в табл. 3). Причина – грозовое перенапряжение от попадания молнии в провод этой фазы линии Л 114. При этом произошло перекрытие изоляции и отключение линии с последующим успешным АПВ (№1 в табл. 4). Аналогичное явление зафиксировано в 21:52 во время грозы 31.07.14 (№2 в табл. 4), при этом, исходя из показаний регистратора, удар молнии пришелся в провод фазы В линии Л-114.

Сравнивая данные регистраторов, установленных на трех подстанциях, можно сделать заключение, что защищаемое ОПН оборудование ПС-30 подвержено как коммутационным, так и грозовым перенапряжениям, а причиной срабатывания ОПН подстанций ПС-112А и ПС-203А являются только грозовые перенапряжения.

Таким образом, опытную эксплуатацию преобразователя тока проводимости с функцией регистрации импульсов тока, проходящих через ОПН под воздействием грозовых и коммутационных перенапряжений, можно считать успешной.

Выводы

В статье описана разработанная недорогая, но многофункциональная система мониторинга состояния ОПН в ходе эксплуатации. Система обеспечивает два метода контроля состояния ОПН, а именно, регистрацию разрядных токов, вызванных грозовыми и коммутационными перенапряжениями, воздействующими на ОПН, и измерение активной составляющей и гармонического состава тока проводимости, протекающего через ОПН под воздействием приложенного рабочего напряжения.

Анализируя опыт эксплуатации в течение грозового сезона 2014 года двенадцати регистраторов ПТПР, установленных на трех подстанциях, можно заключить:

1. Разработанное устройство регистрирует импульсные токи через ОПН, вызванные как коммутационными, так и грозовыми перенапряжениями.

2. Информация о срабатывании ОПН, полученная с помощью устройства, позволяет убедиться в функционировании защитного аппарата и получить данные относительно интенсивности перенапряжений на соответствующем участке сети, защищаемом ОПН.

3. Информация, записанная регистратором, может помочь диагностировать причины возникновения перенапряжений, в том числе критических, приводящих к выходу защитного аппарата из строя. Анализируя данные регистратора можно восстановить процесс развития аварии в защитном аппарате.

4. Данные регистратора позволяют выявить защитные аппараты, подверженные частым или интенсивным импульсным воздействиям, и вовремя принять решение о выводе такого ОПН из эксплуатации. Аналогично, для ОПН, не подверженных интенсивному воздействию импульсных токов, может быть принято решение о продлении его эксплуатации, что в целом позволит обеспечить увеличение надежности работы оборудования подстанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, IEEE Std C62.22-2009 (Revision of IEEE Std C62.22-1997), pp. 1–142, 3 July 2009.

[2] IEC Std 60099-5, Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations, edition 1.1, 2000.

[3] **Heinrich C., Hinrichsen V.** “Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks—comparison of existing and newly developed procedures,” in IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 16, no. 1, pp. 138–143, Jan. 2001.

[4] **Bokoro P.** “A review of leakage current-based condition monitoring techniques of Metal Oxide Surge Arresters,” in Proc. Int. Conf. on Power and Energy Systems (IASTED/AfricaPES), Gaborone, Botswana, Sept. 2016, pp. 388–393.

[5] **Barannik M., Kolobov V.** “System for Monitoring the Condition of Metal-Oxide Surge Arresters in Service,” 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEast-Con), 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271582

[6] **Баранник М.Б., Колобов В.В., Прокопчук П.И.** Разработка устройства регистрации импульсных токов протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений в процессе эксплуатации // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Выпуск 6. — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2013. — 115 с. С. 86–96.

[7] Баранник М.Б., Барбарович В.Ю., Дмитриев В.Л., Колобов В.В. Опыт калибровки и практической эксплуатации прибора для диагностики состояния ОПН типа СКАТ-3 // Приборы. 2011. № 11 (137). С. 40–45.

[8] Колобов В.В., Селиванов В.Н., Баранник М.Б. Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов через ОПН // V Российская конференция по молниезащите. Санкт-Петербург, 17-19 мая 2016 года: сборник докладов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 140–149.

[9] Колобов В.В., Баранник М.Б. Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Выпуск 9. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2014. – С. 13–26.

[10] Баранник М.Б., Данилин А.Н., Каткалов Ю.В., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Система регистрации геоиндуктированных токов в нейтралях силовых автотрансформаторов // Приборы и техника эксперимента. 2012. №1. С. 118–123.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЛОБОВ Виталий Валентинович – ведущий научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук.
E-mail: 1_i@mail.ru

БАРАННИК Максим Борисович – научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, без степени.
E-mail: maxbarien@mail.ru

ИВОНИН Виктор Владимирович – научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, без степени.
E-mail: v.ivonin@ksc.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 18.08.2021

REFERENCES

[1] IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, IEEE Std C62.22-2009 (Revision of IEEE Std C62.22-1997), pp. 1–142, 3 July 2009.

[2] IEC Std 60099-5, Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations, edition 1.1, 2000.

[3] C. Heinrich, V. Hinrichsen, “Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures,” in IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 16, no. 1, pp. 138–143, Jan. 2001.

[4] P. Bokoro, “A review of leakage current-based condition monitoring techniques of Metal Oxide Surge Arresters,” in Proc. Int. Conf. on Power and Energy Systems (IASTED/AfricaPES), Gaborone, Botswana, Sept. 2016, pp. 388–393.

[5] M. Barannik, V. Kolobov, “System for Monitoring the Condition of Metal-Oxide Surge Arresters in Service,” 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEast-Con), 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271582

[6] М.В. Баранник, В.В. Колобов, Р.И. Прокопчук, Разработка устройства регистрации импульсных токов протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений в процессе эксплуатации // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Выпуск 6. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2013. – 115 с. С. 86–96.

[7] **M.B. Barannik, B.Yu. Barbarovich, B.L. Dmitriyev, B.B. Kolobov**, Опыт калибровки и практической эксплуатации прибора для диагностики состояния OPN типа SKAT-3 // Приборы. 2011. № 11 (137). С. 40–45.

[8] **V.V. Kolobov, V.N. Selivanov, M.B. Barannik**, Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов через OPN // V Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite. Sankt-Peterburg, 17-19 maya 2016 goda: sbornik dokladov. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2016. – С. 140–149.

[9] **V.V. Kolobov, M.B. Barannik**, Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов, протекающих через OPN под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений // Trudy KNTs RAN. Energetika. Vypusk 9. – Apatity: Izd-vo Kolskogo nauchnogo tsentra RAN, 2014. – С. 13–26.

[10] **M.B. Barannik, A.N. Danilin, Yu.V. Katkalov, V.V. Kolobov, Ya.A. Sakharov, V.N. Selivanov**, Sistema registratsii geoinduktirovannykh tokov v neytralyakh silovykh avtotransformatorov // Приборы и техника эксперимента. 2012. №1. С. 118–123.

THE AUTHORS

KOLOBOV Vitaliy V. – *NERC KSC RAS.*

E-mail: 1_i@mail.ru

BARANNIK Maksim B. – *NERC KSC RAS.*

E-mail: maxbarien@mail.ru

IVONIN Viktor V. – *NERC KSC RAS.*

E-mail: v.ivonin@ksc.ru

Received: 18.08.2021