

Исследование коммутационных перенапряжений, вызываемых работой вакуумных генераторных выключателей ВГГ-10 и ВГГм-10 на Камской ГЭС

ЛАРИН В.С., ЛОХАНИН А.К., ШЕЙКО П.А.

Приводятся основные результаты экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений при работе вакуумных генераторных выключателей ВГГ-10 и ВГГм-10. Исследования проводились на Камской ГЭС в 2009–2010 гг. для определения воздействий на изоляцию основного электрооборудования и накопления опытных данных. Сделаны выводы о влиянии различных средств защиты на уровни перенапряжений.

Ключевые слова: электростанции, генераторные выключатели, коммутационные перенапряжения, исследования

В настоящее время на электростанциях (ГЭС и ГЭС) для коммутаций генераторов мощностью до 60 МВт номинальным напряжением 6–10 кВ используются маломасляные выключатели МГГ-10, которые практически полностью выработали свой ресурс и требуют замены.

В мировой практике в цепях генераторов до 70 МВт и более нашли применение вакуумные генераторные выключатели. К сожалению, в российской энергетике до недавнего времени полностью отсутствовало производство генераторных выключателей любого типа и их приходилось закупать за рубежом.

В 2006 г. в объединении «Высоковольтный Союз» (г. Ровно) был разработан вакуумный генераторный выключатель (ВГВ) типа ВВГ-10 с электромагнитным приводом, а его выпуск организован на Нижнетуринском электроаппаратном заводе. Одновременно перед объединением и заводом был поставлен вопрос о разработке генераторного выключателя с пружинным приводом. Такой привод был разработан, и выключатель получил наименование ВВГм-10. Оба выключателя прошли испытания на испытательных стендах: ВВГ-10 в ОАО «Уралэлектротяжмаш», а ВВГм-10 в ОАО «НИЦ ВВА». Испытания показали, что их характеристики соответствуют техническим условиям и международному стандарту IEEE Std C37.013–1997.

Внедрение выключателей началось на ОАО «Камская ГЭС» в 2007 г. Первый вакуумный генераторный выключатель с электромагнитным приводом был введён в эксплуатацию в 2007 г. С 2008 г. стали поставляться выключатели типа ВВГм-10. К моменту внедрения данного типа выключателей

Main results obtained from experimental investigations of switching overvoltages arising during operation of VGG-10 and VGGm-10 vacuum generator circuit breakers are presented. The investigations were carried out at the Kama hydraulic power station in 2009–2010 for determining the impacts applied to the insulation of the main electrical equipment and for gaining experimental data. Conclusions are drawn regarding the influence of different means of protection on the overvoltage levels.

Key words: power stations, generator circuit breakers, switching overvoltages, investigations

в отрасли полностью отсутствовали методические материалы по применению ВГВ, что в значительной степени сдерживало их внедрение.

Вакуумные выключатели (ВВ) из-за своих особенностей способны отключать ток (в том числе высокочастотный) до его естественного перехода через нуль, а потому отключение индуктивных токов сопровождается появлением коммутационных перенапряжений. В случае, если напряжение на контактах ВВ превысит прочность межконтактного промежутка, возможны повторные пробои этого промежутка и, следовательно, возникновение повторных зажигания (ПЗ) дуги, сопровождающихся резкими перепадами (градиентами) напряжения, которые, в свою очередь, могут оказаться опасными для изоляции основного оборудования (силовых трансформаторов и генераторов). Для ВГВ отключение индуктивной нагрузки имеет место главным образом при отключении ненагруженного блочного трансформатора и при отключении короткого замыкания за выключателем как на выводах гидрогенератора, так и на стороне блочного трансформатора.

К настоящему времени еще не накоплен значительный опыт эксплуатации ВВ в цепи «генератор–трансформатор», и в каждом конкретном случае их применения необходимо решить следующие вопросы: нужны ли средства защиты изоляции основного оборудования (генератора, блочного трансформатора) от коммутационных перенапряжений, какие именно и с какими характеристиками. Решение этой комплексной задачи помимо всего прочего требует сопоставления импульсной

прочности изоляции электрооборудования и характеристик воздействующих перенапряжений.

Использование математического моделирования позволяет предварительно определить характер протекающих в блоке «генератор—трансформатор» переходных процессов, выбрать тип и характеристики защитных устройств. По инициативе корпорации «Союз» для определения характера коммутационных перенапряжений и их воздействий на изоляцию основного электрооборудования при коммутациях ВГВ были выполнены работы по математическому моделированию переходных процессов. Работы выполнялись в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ), ФГУП ВЭИ и Московском энергетическом институте (МЭИ (ТУ)) для схемы Камской ГЭС, кроме того, были выбраны защитные устройства, определены их параметры и место установки совместно с выключателями ВВГ-10 и ВВГм-10. По итогам своих работ НГТУ рекомендовал для защиты изоляции основного оборудования от коммутационных перенапряжений использовать ОПН-10 с установкой на шинах генераторного напряжения. По результатам работы ВЭИ и МЭИ (ТУ) был сделан вывод о применении защитных РС-цепей также с установкой на шинах генераторного напряжения [1]. После анализа полученных рекомендаций было принято решение о совместной установке ОПН и РС-цепей.

Но для подтверждения достоверности моделирования и правильности выбора параметров защитных устройств, определения реальных воздействий на изоляцию и накопления опытных данных необходимо проведение натурных измерений и экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений на действующих энергообъектах.

Специалистами ФГУП ВЭИ, корпорации «Союз», ОАО «Камская ГЭС» в 2009 и 2010 гг. были проведены экспериментальные исследования коммутационных перенапряжений, вызываемых работой ВГВ. Сняты осциллограммы переходных процессов в ряде режимов работы энергоблока при различном сочетании подключённых средств защиты от коммутационных перенапряжений и двух модификаций выключателя с электромагнитным и пружинным приводом.

Основные характеристики выключателей ВВГ-10 и ВВГм-10 [2, 3]. В выключателях применяется вакуумная дугогасительная камера (ВДК) фирмы Siemens, поскольку отечественные заводы не выпускают вакуумные камеры с требуемыми для ВГВ характеристиками. Конструктивно выключатели имеют трёхфазное исполнение, все три полюса находятся на горизонтальной раме, под которой располагается привод выключателя.

Основные параметры выключателей:

Параметр	ВВГ-10-63/ 4000-УЗ	ВВГм-10-63/ 4000-УЗ
Номинальный ток, А	4000(5000)	4000(5000)
Номинальный ток отключения и начальное действующее значение периодической составляющей, кА	63	63
Ток электродинамической стойкости, кА	161	173
Ток термической стойкости (в течение 3 с), кА	63	63
Нормированное процентное содержание аperiodической составляющей в отключаемом токе, % (не более)	50	50
Собственное время включения и отключения, мс (не более)	50	80
Полное время отключения, мс (не более)	80	100
Ход подвижного контакта, мм	11±1	11±1
Средняя скорость движения контакта, м/с		
при включении на участке 4–0 мм	0,5–0,8	0,8–1,4
при отключении на участке 0–6 мм	1,2–1,4	1,0–1,4

Общая характеристика электрической схемы Камской ГЭС. Для выдачи мощности от гидрогенераторов на Камской ГЭС использована схема укрупнённых блоков и блочные трансформаторы (трехфазные группы однофазных трансформаторов ОДГ-63333/110 и ОДГ-63333/220) с расщеплёнными обмотками низшего напряжения (НН). В состав укрупнённого блока №2, где проводились исследования, входят шесть генераторов (Г-7–Г-12) мощностью по 21–24 МВт и номинальным напряжением 10 кВ. К каждой из обмоток НН блочного трансформатора присоединены три генератора (Г-7–Г-9 и Г-10–Г-12), объединённые соответствующими полусекциями 10 кВ («3 п/с» и «4 п/с»).

В 2008 г. в цепи генератора Г-12 был демонтирован МГГ-10 и установлен ВГВ типа ВВГ-10 с электромагнитным приводом. В последующие годы при замене остальных маломасляных выключателей (на генераторе Г-11 и др.) устанавливались выключатели ВВГм-10 (с идентичной ВВГ-10 вакуумной дугогасительной камерой) с пружинным приводом.

Для защиты от коммутационных перенапряжений на шинах четвертой полусекции («4 п/с») установлен комплект ОПН-10/11-10/650(II) производства ЗАО «Феникс-88» и защитные РС-цепи производства ОАО «КВАР» ёмкостью 0,1 мкФ и активным сопротивлением 40 Ом.

Методика проведения экспериментальных работ. Для регистрации коммутационных перенапряжений были применены цифровые осциллографы (ЦО) с высокой разрешающей способностью и

большим объемом памяти (более 128 тыс. выборок).

Известно, что при работе ВВ характерные частоты переходных процессов могут составлять десятки кГц и более. Для регистрации таких высокочастотных процессов обычные трансформаторы напряжения не пригодны из-за сильной частотной зависимости коэффициента трансформации, поэтому наиболее достоверным будет использование делителей напряжения (емкостных, емкостно-омических). При этом на используемые делители накладываются ограничения: они не должны оказывать влияния на фиксируемые процессы и обладать практически постоянным в широком диапазоне частот коэффициентом деления.

Для измерения переходных процессов на высоком напряжении ВЭИ были разработаны и изготовлены соответствующие отмеченным требованиям емкостно-омические делители ДЕО-100 (входное сопротивление 100 МОм, входная емкость 100 пФ, номинальный коэффициент делителей на частоте 50 Гц – 1000:1). Измерение амплитудно-частотных характеристик изготовленных делителей показало, что при увеличении частоты с 50 Гц до 100 кГц коэффициент деления меняется незначительно – не более 10%.

При проведении работ выполнялось осциллографирование фазных напряжений на выключателе со стороны генератора и блочного трансформатора, токов через выключатель и токов через ОПН. С этой целью была использована измерительная система (рис. 1).

Для регистрации напряжений были использованы шесть высоковольтных делителей ДЕО-100, размещенных в ячейке ВГВ, и осциллографы Bordo В-423, обладающие большой разрешающей способностью (10 бит), что обеспечивает более точное

определение значений измеряемого сигнала в области малых значений, а также возможность построения разницы двух сигналов при относительно малых значениях каждого из них.

Регистрация токов через выключатель осуществлялась с помощью высокочастотных промежуточных ТТ, которые подключались к вторичным цепям штатных ТТ, установленных на шинах 10 кВ между генератором и ячейкой выключателя (рис. 1). Для фазных токов не требовалось последующего вычисления разности двух сигналов и большой дискретности по вертикали цифрового осциллографа, потому для их регистрации использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS5034В (с разрешающей способностью 8 бит), который размещался рядом с ЦО В-423 вблизи ячейки выключателя.

Измерение токов через ОПН осуществлялось с помощью высокочастотных токовых клещей Tektronix А621, представляющих собой преобразователи «ток–напряжение», сигналы с которых записывались осциллографом Tektronix DPO3014, размещенным в шинном коридоре «4 п/с».

Для точной привязки к моменту включения и отключения генераторного выключателя запуск осциллографов Осц. №1 (TDS5034В) и Осц. №3 (DPO3014) выполнялся в ждущем режиме по сигналу, снимаемому с электромагнитов включения и отключения генераторного выключателя, комплект осциллографов Осц. №2 (В-423) в свою очередь запускался от сигнала запуска осциллографа Осц. №1 (TDS5034В).

Задачи экспериментальных работ и регистрируемые режимы. При проведении экспериментальных работ ставились следующие цели:

накопить экспериментальные данные по коммутационным перенапряжениям, вызванным работой вакуумных генераторных выключателей, и определить эксплуатационные воздействия на изоляцию основного электрооборудования;

получить количественные характеристики по кратности перенапряжений, числу повторных зажигания дуги и частоте их следования, скорости роста переходного напряжения перед ПЗ, а также градиентам (перепадам) напряжения сразу после ПЗ, поскольку для продольной изоляции обмоток генератора и трансформатора определяющим является не только амплитуда перенапряжений, но и значение градиента напряжения;

определить качественное и количественное влияние защитных RC-цепей и ОПН, тип и характеристики привода выключателя (электромагнитного и пружинного);

подтвердить экспериментально необходимость применения защитных устройств (RC-цепей и

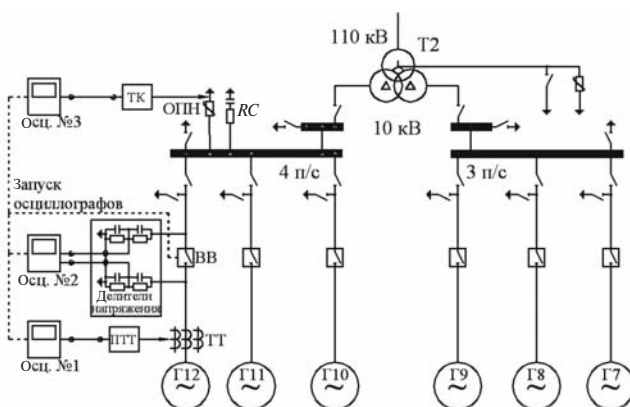


Рис. 1. Схема измерительной системы (точки подключения измерительной аппаратуры): Осц. – цифровой осциллограф; ТТ – трансформаторы тока; ПТТ – промежуточные трансформаторы тока; ВВ – вакуумный выключатель; ТК – токовые клещи; - - - цепи синхронного запуска ЦО

ОПН) совместно с выключателем ВГГ-10 (ВГГм-10) и правильность выбора параметров защитных устройств;

регистрировать процессы при включении генератора в сеть методом самосинхронизации.

Осциллографирование переходных процессов было проведено на двух генераторах Г-12 (выключатель ВГГ-10) и Г-11 (выключатель ВГГм-10) для следующих режимов работы энергоблока.

1. Включение генератора в сеть методом самосинхронизации, при котором гидрогенератор имеет подсинхронную скорость вращения и напряжение возбуждения подаётся «толчком» на возбужденный генератор после его подключения к полусекции 10 кВ (сети).

2. Отключение генератора от сети в штатном режиме с предварительным снижением генерируемой мощности.

3. Отключение генератора от сети со «сбросом нагрузки» без предварительного снижения мощности, при этом ток, отключаемый вакуумным выключателем, варьировался в диапазоне от 0,7 до 1,4 кА (50–100% номинального тока гидрогенератора).

4. Отключение блочного трансформатора с короткозамкнутой обмоткой высшего напряжения. Для того чтобы обезопасить оборудование от воздействия больших токов, была выполнена имитация режима КЗ при номинальном токе и пониженном выходном напряжении генератора с действующим значением перед отключением порядка 0,4–0,5 кВ. Столь малое напряжение практически исключает повторные зажигания дуги в вакуумной камере, поэтому цель таких измерений – получить качественную картину переходного процесса при отключении короткозамкнутого блочного трансформатора.

5. Отключение генераторным выключателем ненагруженного блочного трансформатора, работающего на холостом ходу. Остальные генераторы укрупнённого блока при этом были выведены из работы.

Каких-либо существенных перенапряжений в режимах по пп. 1–3 зафиксировано не было, а потому с точки зрения воздействий на изоляцию электрооборудования наибольший интерес представляет именно последний режим – п. 5, и именно в этом режиме было выполнено более подробное исследование.

При отключении ненагруженного блочного трансформатора выключателями ВГГ-10 и ВГГм-10 были проведены по две серии измерений: при подключенных к шинам «4 п/с» 10 кВ защитных RC-цепях (серия 1) и при отключенных RC-цепях (серия 2). В измерениях 2009 г. на генераторе Г-12

было выполнено три и шесть операций включения/отключения в сериях 1 и 2 соответственно. В измерениях 2010 г. число отключений было значительно увеличено: на генераторе Г-12 в серии 1 было выполнено 17 операций включения/отключения ненагруженного трансформатора, а серии 2 – 18 операций включения/отключения. На генераторе Г-11 было выполнено 14 и 15 операций включения/отключения в серии 1 и 2 соответственно. Отключения ОПН от шин «4 п/с» не было из-за опасений повреждения оборудования.

Результаты осциллографирования процесса отключения ненагруженного блочного трансформатора выключателем ВГГ-10. Действующее значение тока холостого хода трансформатора до отключения составляло 40–55 А, напряжение на шинах в диапазоне от 9,7 до 10,5 кВ. В измерениях 2009 г. из 9 операций отключения ненагруженного блочного трансформатора выключателем ВГГ-10 повторные зажигания дуги в ВДК были зафиксированы в четырех отключениях (табл. 1). В более подробных измерениях 2010 г. повторные зажигания дуги зафиксированы в 10 отключениях из 35 выполненных, т.е. почти в 30% всех отключений.

Ток среза выключателя в большинстве отключений составлял не более 3–5 А. Наличие значительной емкости на шинах 10 кВ предопределило характер изменения напряжения на стороне НН трансформатора. На всех осциллограммах выбросы напряжения непосредственно после среза тока незначительны (не более 3–4 кВ), что позволяет сделать вывод о том, что значение тока среза в данном случае не оказывает существенного влияния на уровень перенапряжений.

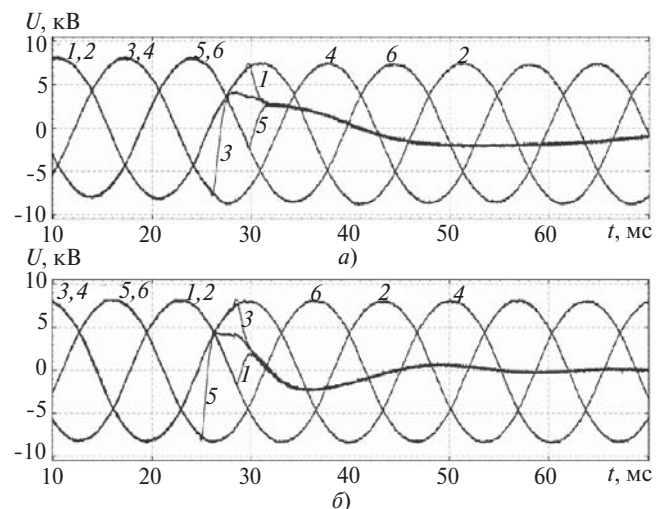


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на выключателе со стороны трансформатора (1, 3 и 5) и генератора (2, 4 и 6) для фаз А (1, 2), В (3, 4) и С (5, 6): а – коммутация №3, RC-цепи подключены; б – коммутация №18, RC-цепи отключены

Таблица 1

Год	Номер операции «выключение/отключение»	Наличие RC-цепи	Первая отключаемая фаза	Число ПЗ	Ток среза, А	Значение dU/dt ПВН**, кВ/мс	Кратность фазных перенапряжений (фаза)***		Кратность «градиентных» перенапряжений (фаза)***	
							генератор	трансформатор	генератор	трансформатор
2009*	1	Есть	<i>B</i>	5	-	-	-	-2,1 (<i>A</i>)	-	-1,6 (<i>A</i>)
	3	Есть	<i>A</i>	2	-	-	-	-1,5 (<i>A</i>)	-	1,5 (<i>A</i>)
	5	Нет	<i>B</i>	4	-	-	-	-3,2 (<i>A</i>)	-	-2,4 (<i>A</i>)
	9	Нет	<i>A</i>	7	-	-	-	-3,2 (<i>C</i>)	-	-2,9 (<i>A</i>)
2010	1	Есть	<i>C</i>	1	4	12,0	-1,4 (<i>C</i>)	-1,5 (<i>C</i>)	-1,0 (<i>C</i>)	-1,7 (<i>C</i>)
	2	То же	<i>A</i>	1	<1	12,2	-1,2 (<i>A</i>)	-1,2 (<i>A</i>)	-0,5 (<i>A</i>)	-0,8 (<i>C</i>)
	4	-"	<i>B</i>	2	-4	12,1	1,4 (<i>B</i>)	-2,7 (<i>A</i>)	1,0 (<i>B</i>)	-2,5 (<i>A</i>)
	10	-"	<i>A</i>	1	<1	11,1	1,3 (<i>A</i>)	1,3 (<i>A</i>)	0,6 (<i>A</i>)	1,1 (<i>A</i>)
	16	-"	<i>C</i>	1	3	11,7	1,4 (<i>C</i>)	1,4 (<i>C</i>)	0,9 (<i>C</i>)	1,4 (<i>C</i>)
	19	Нет	<i>A</i>	3	4	13,6	-1,5 (<i>A</i>)	-1,6 (<i>A</i>)	-0,9 (<i>A</i>)	-0,9 (<i>A</i>)
	21	То же	<i>B</i>	6	<1	11,3	1,5 (<i>B</i>)	-2,7 (<i>A</i>)	1,3 (<i>B</i>)	-2,6 (<i>A</i>)
	25	-"	<i>B</i>	4	<1	12,3	1,6 (<i>B</i>)	1,3 (<i>B</i>)	1,1 (<i>B</i>)	1,6 (<i>B</i>)
	26	-"	<i>B</i>	9	5	11,9	1,5 (<i>B</i>)	-2,7 (<i>A</i>)	1,1 (<i>B</i>)	-2,6 (<i>A</i>)
34	-"	<i>B</i>	4	4	13,2	-1,7 (<i>B</i>)	-2,1 (<i>B</i>)	1,2 (<i>A</i>)	-2,4 (<i>B</i>)	

* В измерениях 2009 г. токи через выключатель и ОПН и напряжения со стороны генератора при отключениях трансформатора не регистрировались. ** Оценочное значение скорости роста переходного восстанавливающегося напряжения до первого ПЗ. *** По отношению к амплитуде фазного рабочего напряжения до коммутации.

Таблица 2

Состояние RC-цепей	Номер коммутации	Первая отключаемая фаза	Число ПЗ	Скорость восстановления прочности k , кВ/мс	Время начала восстановления прочности t_0 , мс
Включены	4	<i>B</i>	2	3,68	22,72
Отключены	19	<i>A</i>	3	11,18	24,59
То же	21	<i>B</i>	6	6,14	23,87
-"	25	<i>B</i>	4	5,73	24,15
-"	26	<i>B</i>	9	6,41 (10,87)	25,05 (26,13)
-"	34	<i>B</i>	4	7,42	25,60

На рис. 2 приведены характерные осциллограммы напряжений на выключателе со стороны трансформатора и генератора без повторных зажигания. Остальные осциллограммы без повторных зажиганий в целом аналогичны приведенным.

Характерные осциллограммы напряжений на выключателе со стороны генератора и трансформатора с повторными зажиганиями приведены на рис. 3.

Из анализа результатов измерений следует, что установка защитных RC-цепей значительно устраняет высокочастотную составляющую переходного восстанавливающегося напряжения на стороне трансформатора, за счет чего существенно умень-

шается число повторных зажиганий (с 3–9 до 1–2). Вместе с тем, при измерениях как при отсутствии, так и наличии RC-цепей были получены схожие максимальные кратности перенапряжений на уровне $2,7U_{фм}$, где $U_{фм}$ – амплитудное фазное напряжение на шинах до отключения. Объяснить это можно идентичностью в последовательности процессов, приводящих к «виртуальному» срезу тока в ВДК фазы *A*: повторное зажигание дуги в ВДК фазы *B*; бросок высокочастотного тока в фазе *B* и протекание соответствующего обратного тока по фазам *A* и *C*; переход высокочастотного тока фазы *A* через нуль и его отключение, за которым следует

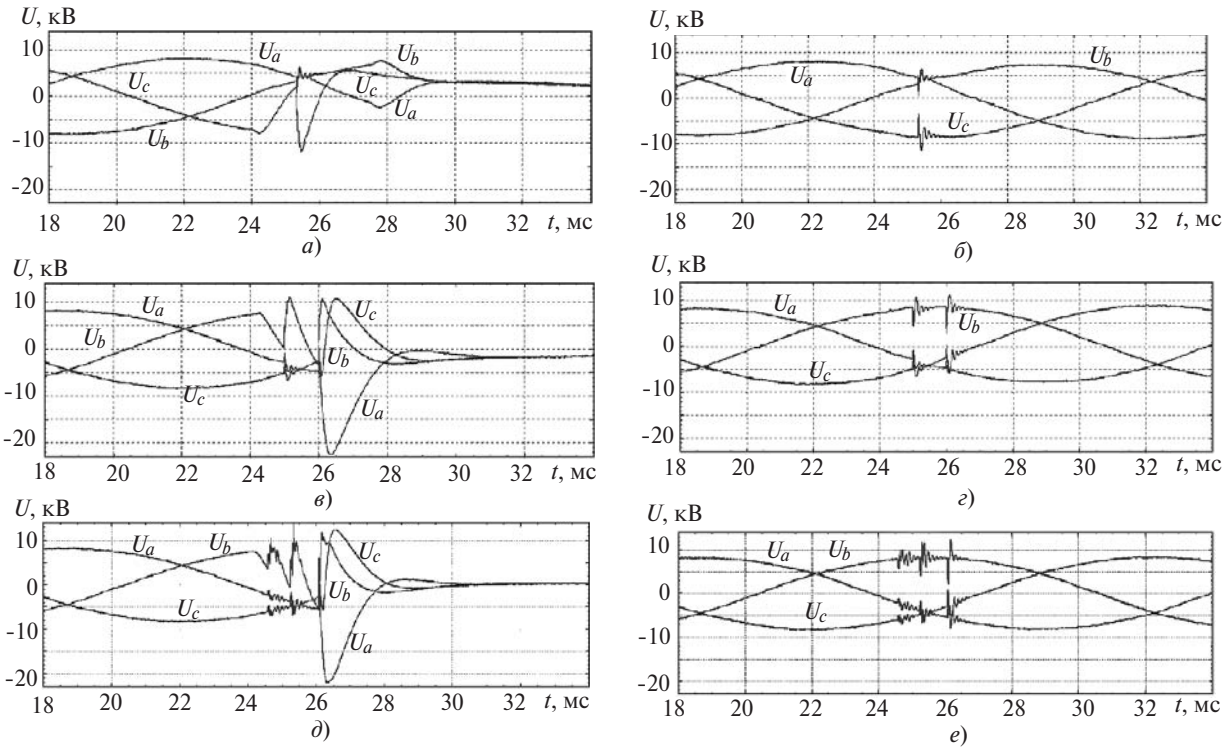


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на выключателе со стороны трансформатора (а, в, д) и генератора (б, з, е) по фазам А (U_a), В (U_b) и С (U_c): а – коммутация №1, RC-цепи подключены; б – коммутация №4, RC-цепи подключены; в – коммутация №21, RC-цепи отключены

выброс напряжения в фазе А до уровня $2,7U_{фм}$ (рис. 4).

Вместе с тем, установка RC-цепей оказывает влияние на снижение так называемых «градиентных» перенапряжений, могущих представлять

опасность для продольной изоляции обмоток трансформаторов и вращающихся машин.

Анализ «градиентных» перенапряжений по полученным осциллограммам показал следующее. До повторного зажигания напряжение на генераторе

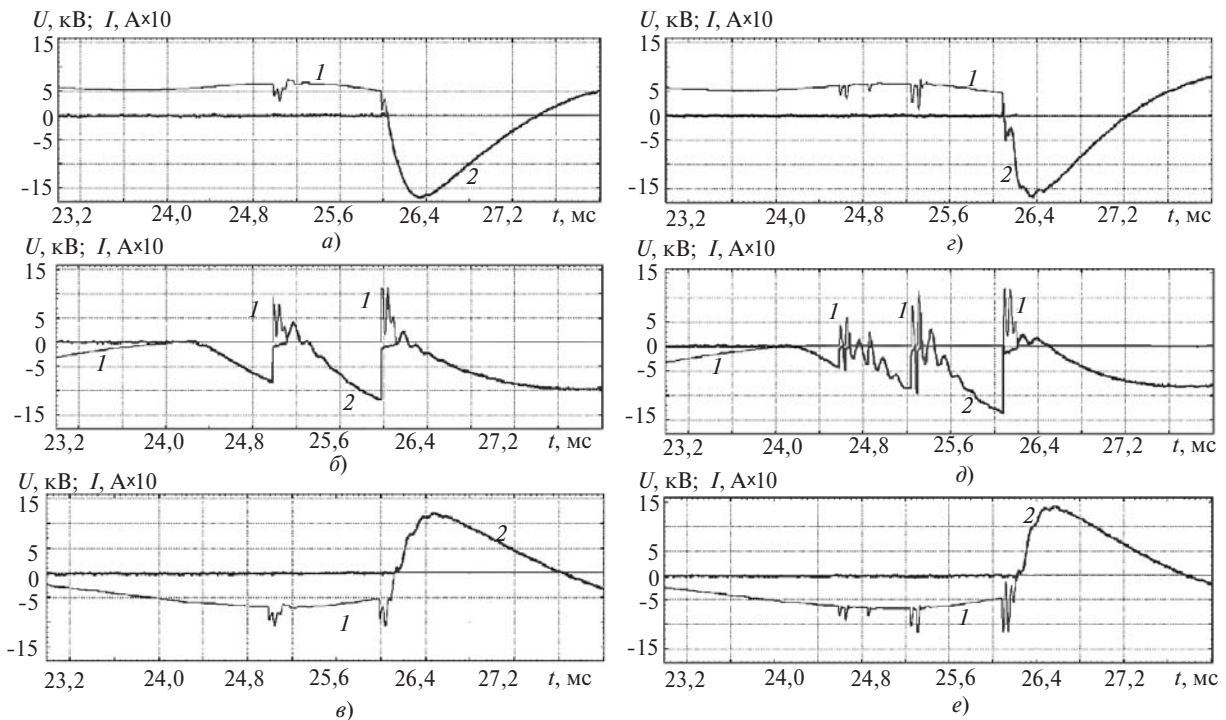


Рис. 4. Кривые токов через выключатель (1) и напряжения на контактах выключателя (2) по фазам А (а, з), В (б, д) и С (в, е) для коммутации №4 (RC-цепи включены, а–в) и №21 (RC-цепи отключены, з–е)

фиксировано, а напряжение на сборных шинах определяется переходным восстанавливающимся напряжением. В момент повторного зажигания происходит резкое изменение напряжения на трансформаторе и генераторе, связанное с перезарядом емкости генератора с одной стороны и емкости подключенного к сборным шинам оборудования с другой. Поскольку первая емкость, емкость генератора, больше емкости подключенного к шинам оборудования (особенно при отсутствии RC -цепей на шинах «4 п/с»), напряжение на генераторе в момент ПЗ меняется в меньшей степени, а потому ожидать больших градиентных перенапряжений на стороне генератора не приходится (табл. 2).

За резким изменением напряжения в момент ПЗ следует высокочастотный переходный процесс длительностью до 100–150 мс, вызывающий колебание напряжения на генераторе, который прекращается на стороне генератора в момент перехода высокочастотного тока через нуль, гашением дуги в ВДК и отключением фазы генератора от сборных шин. При отмечаемом переходном процессе возможны несколько больших «градиентных» перенапряжений по сравнению с моментом ПЗ, но с большой эквивалентной длительностью соответственно.

Иначе дело обстоит с «градиентными» перенапряжениями на стороне трансформатора. Максимальную кратность «градиентных» перенапряжений в момент ПЗ можно оценить по напряжению на контактах ВДК перед ПЗ. Наибольшее значение было получено для коммутации №28 (с отключенными RC -цепями), когда напряжение на контактах при последнем ПЗ в фазе B составило $1,6U_{фм}$. Наибольшая кратность «градиентных» перенапряжений, связанная с переходным процессом после ПЗ, была получена также для коммутации №26 с отключенными RC -цепями (коммутация с «виртуальным срезом») и составила $2,6U_{фм}$ при характерной длительности около 300 мкс. Для двух других коммутаций с «виртуальным срезом» были получены близкие кратности «градиентных» перенапряжений (2,5 и 2,6).

Как следует из данных табл. 1, подключение RC -цепей несколько снизило кратность «градиентных» перенапряжений. При этом во всех случаях уровень градиентных перенапряжений на стороне генератора весьма низкий. Таким образом, по итогам проведенных измерений каких-либо серьезных перенапряжений, опасных для изоляции генератора, зафиксировано не было.

Наличие осциллограмм с двумя и более повторными зажиганиями позволяет сделать оценку скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка выключателя ВГГ-10

при отключении малых индуктивных токов. Основываясь на предположении о линейном изменении электрической прочности межконтактного промежутка вакуумной камеры во времени и представлении ее выражением $U_{пр}(t) = k(t - t_0)$, где k – скорость роста прочности, t_0 – время начала роста прочности от момента подачи сигнала на отключение выключателя, были определены значения k и t_0 , дающие хорошее согласие расчетных значений $U_{пр}(t)$ со значениями напряжений на контактах выключателя в момент повторных зажигания (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что случаи двух и более повторных зажигания в основном имеют место, если первой отключается фаза B выключателя. При этом в двух сериях измерений с подключенными и отключенными RC -цепями (всего 35 коммутаций) общее число отключений, приходящихся на каждую из фаз, оказалось достаточно близким: 13, 12 и 10 для фаз A , B и C соответственно. Объяснить этот факт можно сравнительно низкой скоростью восстановления прочности для полюса фазы B (табл. 2), что, возможно, связано с незначительным изменением (для каждой из фаз) скорости расхождения контактов в течение первых 1–2 мс с момента начала расхождения из-за разных усилий контактных пружин привода и наличия некоторого люфта. С этим вероятно также связаны полученные для фазы B разбросы в значениях скорости восстановления прочности.

Любопытный результат был получен для коммутаций №21 и №26 при отключенных RC -цепях, в которых зафиксированы снижения скорости роста электрической прочности после одного из ПЗ. Так, при коммутации №26 (рис. 5) прочность межконтактного промежутка сначала увеличивалась со скоростью немногим более 6 кВ/мс, но после четвертого ПЗ, последующих осцилляций и смены полярности напряжения на контактах (к моменту времени 24,3 мс) прочность межконтактного промежутка упала более чем 2 раза и продолжила свой рост со скоростью более 10 кВ/мс.

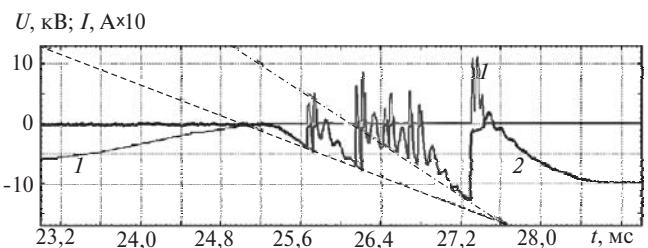


Рис. 5. Фазный ток (I), напряжение на контактах ВДК фазы B (U) и оценка изменения во времени прочности межконтактного промежутка ВДК (--- $k = 6,41$ кВ/мс, $t_0 = 25,05$ мс; - · - · - $k = 10,87$ кВ/мс, $t_0 = 26,13$ мс) для коммутации №26 (RC -цепи отключены)

При небольших значениях зафиксированных кратностей перенапряжений (не более $2,7U_{фm}$) ожидать значимых токов через ОПН не приходится, что и показали результаты осциллографирования. Различные для измерительной системы импульсы тока с максимальным значением не более 2 А были зафиксированы при коммутациях, сопровождавшихся «виртуальными» срезами. Вместе с тем, наличие тока через ОПН позволяет сделать вывод, что в отмеченных коммутациях уровень перенапряжений был в некоторой степени ограничен действием ОПН.

Результаты осциллографирования процесса отключения ненагруженного блочного трансформатора выключателем ВГГм-10. Из 29 выполненных операций отключения ненагруженного блочного трансформатора выключателем ВГГм-10 повторные зажигания дуги в ВДК были зафиксированы лишь в одном отключении, в котором были два ПЗ в фазе А (коммутация №11, RC-цепи включены) и не сопровождались сколько-либо значимыми перенапряжениями. Токи среза по измерениям составили в основном не более 3–5 А как и в случае ВГГ-10, что объясняется одним типом применяемой в этих выключателях ВДК. По остальным параметрам были также получены результаты, аналогичные тем, что имели место на генераторе Г-12 с установленным выключателем ВГГ-10: углы отключения $62\text{--}70^\circ$, скорость роста переходного восстанавливающего напряжения $10\text{--}13$ кВ/мс. Это позволяет сделать вывод, что основной причиной отсутствия ПЗ является большая скорость роста электрической прочности межконтактного промежутка ВГГм-10, т. е. большая скорость перемещения подвижного контакта на первых миллиметрах его движения.

В предположении о постоянной скорости расхождения контактов и линейном росте прочности межконтактного промежутка через две точки кривой напряжения на контактах фазы А, соответствующих повторным зажиганиям, можно построить линию восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка (рис. 6, - - -), которой соответствует уравнение $U(t) = 5,72(t - 30,6)$ кВ, где t – время в миллисекундах.

Однако, как видно из рис. 6, такое допущение и определение кривой прочности всего по двум точкам приводит к ошибочным результатам. С одной стороны, прочность по полученному выражению начинает расти с момента $t = 30,60$ мс, что возможно только в случае начала расхождения контактов после момента гашения тока ($t = 30,52$ мс), а потому не соответствует действительности, поскольку именно расхождение контактов является причиной отключения тока. С другой стороны, при такой за-

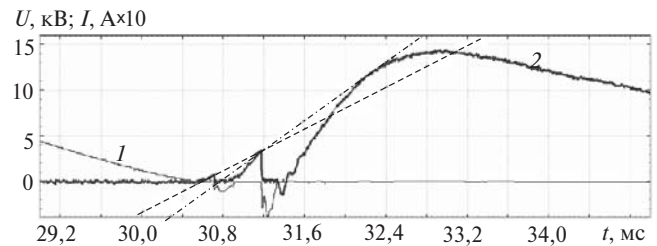


Рис. 6. Фазный ток (1), напряжение на контактах ВДК фазы А (2) и оценка изменения во времени прочности межконтактного промежутка ВДК (- - - $k = 5,72$ кВ/мс, $t_0 = 30,60$ мс; - - - - $k = 8,00$ кВ/мс, $t_0 = 30,75$ мс) для коммутации №11 (RC-цепи включены)

висимости прочности к моменту времени $t = 31,86$ мс должно было произойти третье повторное зажигание, которого не было. Исходя из этого, можно предположить, что скорость роста прочности в данном случае не была постоянной ($5,72$ кВ/мс) на первых 2 мс после расхождения и увеличивалась со временем. В интервале $0,2$ мс с момента отключения тока скорость роста прочности была меньше отмеченной ранее, а спустя $1,5$ мс после отключения тока скорость роста прочности была более $8,0$ кВ/мс.

Сопоставление полученных уровней перенапряжений с прочностью изоляции оборудования. Для силовых трансформаторов в соответствии с [4] нормированы импульсные испытания, и вопросы их импульсной прочности к настоящему времени достаточно хорошо изучены [5]. В то же время для генераторов стандарт [6] и заменивший его [7] таких испытаний не предусматривают. Для генераторов 10 кВ мощностью более 10 МВт нормированные кратковременные испытательные напряжения промышленной частоты относительно корпуса составляют 24 кВ по [6] (это значение указано также в РД 34.45-51.300-97) и 21 кВ по [8]. Изоляция между смежными витками гидрогенераторов в соответствии с указанными стандартами испытывается повышенным на 50% сверх номинального напряжением.

В стандарте [8] импульсные испытания нормированы для катушечных обмоток, однако проведение испытаний полностью собранной вращающейся машины не предусматривается из-за сложности обнаружения возможных повреждений изоляции. Испытания проводят, как правило, на макетных образцах обмоток. Импульсная прочность изоляции вращающихся машин определяется не только формой воздействующего напряжения, но и конструктивными параметрами обмоток машины, а поэтому приводимые в [9] данные об импульсной прочности требуют серьезного анализа, в особенности для машин со стержневыми обмотками.

Таким образом, вопрос об импульсной прочности генераторов и допустимых кратковременных повышениях напряжения остается открытым, и единственное, на что можно ориентироваться, — это указанный уровень одноминутного испытательного напряжения. По итогам работы можно констатировать, что максимальное значение напряжения на генераторе не превосходит уровня одноминутного испытательного напряжения 50 Гц для обмотки статора генератора.

Выводы. 1. По итогам регистрации переходных процессов в режимах включения/отключения генератора в сеть не зафиксировано каких-либо существенных перенапряжений.

2. При отключении выключателем ВГГ-10 ненагруженного блочного трансформатора установлено, что повторные зажигания дуги в ВДК из 35 выполненных коммутаций имеют место в 10 (около 30% всех коммутаций). При отключениях выключателем ВГГм-10 не зафиксировано каких-либо существенных перенапряжений ни в одной из 29 проведенных коммутаций из-за практически полного отсутствия повторных зажиганий дуги в ВДК (лишь в одном из 29 отключений было два ПЗ).

3. Отключение малых индуктивных токов выключателями ВГГ-10 и ВГГм-10 сопровождается срезам тока, в основном не превосходящими 3–5 А.

4. Установка защитных RC-цепей значительно снижает высокочастотную составляющую переходного восстанавливающегося напряжения на стороне ненагруженного трансформатора при его отключении и число повторных зажиганий.

5. Ввиду незначительного числа отключений с ПЗ на выключателе ВГГм-10 возможна лишь приближенная оценка нижней границы скорости роста прочности межконтактного промежутка в течение первых двух миллисекунд с момента расхождения контактов, которая дает значение не менее 8 кВ/мс. Оценочное значение скорости роста прочности для выключателя ВГГ-10 несколько ниже — 3,6–7,4 кВ/мс.

6. При отключении ВВГ-10 и возникновении перенапряжений кратностью $2,7U_{фm}$ были зафиксированы токи через ОПН с максимальным значением менее 2 А, которые имеют место при напряжении на ОПН более 20 кВ, что позволяет сделать вывод о срабатывании ОПН и некотором ограничении перенапряжений в рассматриваемых случаях.

7. На выключателе ВГГ-10 было установлено, что в схеме выдачи мощности Камской ГЭС перенапряжения с кратностями более $2U_{фm}$ имеют место при «виртуальных» срезах тока, а перенапряжения с кратностью более $3,0U_{фm}$ — в случае повтор-

ного зажигания, следующего за «виртуальным» срезом.

8. По итогам выполненных измерений каких-либо серьезных перенапряжений (в том числе «градиентных»), опасных для изоляции генератора, зафиксировано не было. Максимальное значение напряжения на генераторе не превосходит 15 кВ, что меньше одноминутного испытательного напряжения 50 Гц для обмотки статора генератора по ГОСТ 183–74 и ГОСТ Р 52776–2007.

9. При применении вакуумного генераторного выключателя в каждом конкретном случае определение параметров защитных RC-цепей целесообразно выполнять на основе математического моделирования. Возможность отказа от RC-цепей окончательно не установлена. Необходимо продолжение начатых исследований на энергообъектах, на которых для защиты изоляции основного оборудования установлены только ОПН.

10. Необходимо разработать для проектных институтов нормативный документ по применению вакуумных генераторных выключателей, например методические указания.

11. Следует продолжить дальнейшие измерения коммутационных перенапряжений как на ОАО «Камская ГЭС», так и на других объектах.

Авторы выражают благодарность и признательность руководству и персоналу станции ОАО «Камская ГЭС» за возможность впервые провести подобные испытания, а также неоценимые содействие и помощь в организации и проведении работ. Авторы отмечают большой вклад в эту работу к.т.н. Г.А. Владимирова и З.Е. Пугаченко, принимавших активное участие в подготовке и проведении измерений. В измерениях также принимали участие Ю.А. Волков, Е.А. Милкин и Н.Ю. Семенов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев С.А., Лоханин А.К., Матвеев Д.А. Защита генератора гидроэлектростанции от перенапряжений, инициируемых коммутациями вакуумного генераторного выключателя. — Труды конф. ТРАВЭК-2008.
2. ВУИЕ.670049.006 ТИ. Выключатель вакуумный серии ВГГ-10. Редакция 4, 2009.
3. ВУИЕ.670049.007 ТИ. Выключатель вакуумный серии ВГГм-10. Редакция 1, 2009.
4. ГОСТ 1516.3–96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. — М.: Изд-во стандартов, 1998.
5. Силовые трансформаторы. Справочная книга/Под. ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. — М.: Энергоиздат, 2004.
6. ГОСТ 183–74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования, 2001.
7. ГОСТ Р 52776–2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики, 2010.
8. IEC 60034–15. Impulse voltage withstand levels of rotating a.c. machines with form-wound stator coils. 3 ed., 2009.
9. IEEE Working Group Progress Report. Impulse Voltage Strength of AC Rotating Machines. — IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, August 1981, vol. PAS-100, № 8.

Авторы: Ларин Василий Серафимович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ (ТУ)) в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов». Ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ.

Лоханин Андрей Константинович окончил ЭЭФ МЭИ в 1958 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Вопросы координации изоляции силовых трансформаторов для передач переменного и постоянного тока сверхвысокого напряжения» в ВЭИ. Скончался в 2011 г.

Шейко Павел Антонович окончил ЭЭФ МЭИ в 1966 г. Технический консультант корпорации «Союз».