

Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.1. Условия возникновения и защитные мероприятия

ЛАРИН В.С.

Рассмотрены условия возникновения и основные особенности резонансных перенапряжений в различных типах обмоток трансформаторов, а также типовые электрические схемы энергообъектов и коммутации, потенциально опасные в связи с резонансными перенапряжениями. Приведен практический пример, иллюстрирующий одну из потенциально опасных схем и напряжения, воздействующие на трансформатор. Рассмотрены и описаны возможные мероприятия по защите от резонансных перенапряжений обмоток трансформаторов, вызываемых взаимодействием с электрической сетью.

Ключевые слова: трансформаторы, резонансные перенапряжения, обмотки, колебания обмоток, защита от перенапряжений

Силовые трансформаторы (автотрансформаторы) являются одним из ключевых и ответственных элементов в цепочке передачи и распределения электроэнергии. В переходных режимах, вызванных коммутациями или короткими замыканиями в питающих сетях, силовые трансформаторы активно взаимодействуют с другими элементами электрических сетей. Такое электрическое взаимодействие носит сложный характер, и нередко при неблагоприятном стечении обстоятельств его следствием может стать повреждение изоляции трансформатора.

Актуальностью и важностью этой тематики были продиктованы организация по линии СИГРЭ рабочей группы А2-С4.39 «Электрические переходные взаимодействия между трансформатором и электрической системой» (JWG A2-C4.39 «Electrical transient interaction between transformer and power system», 2008–2013 гг.) и публикация соответствующей технической брошюры в двух частях [1, 2], где упомянуто несколько десятков случаев повреждений трансформаторов, произошедших в последнее время в разных странах мира из-за их переходного взаимодействия с электрической системой.

Одним из проявлений электрического взаимодействия с питающей сетью является возникновение внутреннего резонанса в обмотках трансформатора в случае, когда частота колебаний напряжения в сети на его входных зажимах оказывается близкой к одной из собственных частот колебаний обмоток. Если при этом вторичные обмотки трансформатора не нагружены, такие резонансные явления в обмотках могут сопровождаться значительными перенапряжениями на внутренней изоляции трансформатора, при которых напряжение на отдельных частях изоляции обмоток сопоставимо либо превышает напряжение на его входных зажимах. Опасность явления резонанса в обмотках трансформатора усугубляется еще и тем, что внеш-

ние ограничители перенапряжений, устанавливаемые на входных зажимах трансформатора, оказываются не способными в принципе ограничить такого рода перенапряжения, возникающие на отдельных элементах внутри трансформатора.

По указанным причинам резонансные перенапряжения потенциально представляют угрозу для внутренней изоляции обмоток трансформаторов. Как правило, вследствие резонансных явлений большие электрические воздействия имеют место как на продольной изоляции обмоток (в первую очередь, во входной зоне), так и на главной изоляции (на некотором удалении от входной зоны обмотки), и именно повреждениями этих элементов изоляции обмоток могут проявить себя резонансные перенапряжения.

Необходимо отметить, что в эксплуатации при коммутациях или коротких замыканиях возникающие колебательные напряжения имеют затухающий характер, а потому резонансные перенапряжения с предельными кратностями в обмотках могут просто не успеть развиваться. Вместе с тем, внутренняя изоляция масляных трансформаторов представляет собой композицию, состоящую из многих слоев. Так например, витковая изоляция проводов может состоять из трех и более слоев кабельной бумаги на одну сторону; в главной изоляции обмоток ток в общем случае может быть более одного изоляционного барьера. Многократное воздействие резонансных перенапряжений может привести к последовательной деградации твердой изоляции и последующему существенному снижению электрической прочности внутренней изоляции трансформаторов. Возможность такого кумулятивного эффекта – накопления разрушения изоляции, в свою очередь, может стать причиной повреждения внутренней изоляции трансформатора уже под действием рабочего напряжения через некоторое время с момента

начала эксплуатации этого трансформатора. В случае такого сценария анализ причин повреждения трансформатора затруднителен. Следует отметить, что в последнее время нередки случаи, когда при разборе повреждений «неясной» природы наряду с версиями о наличии производственных дефектов предлагается версия «высокочастотных перенапряжений» [3].

В зарубежной литературе также можно найти описание случаев повреждений мощных силовых трансформаторов, подключаемых к КРУЭ через кабельную линию. Например, в [4] отмечаются три последовательных повреждения блочных трансформаторов класса напряжения 345 кВ, установленных на гидроэлектростанции, а в [5] – повреждения блочного трансформатора 500 кВ и также на гидроэлектростанции. Примечательно, что в этих случаях трансформаторы вышли из строя в том числе и во время «нормальной» работы при отсутствии каких-либо коммутаций.

Можно отметить ряд общих обстоятельств в упомянутых случаях повреждений трансформаторов [3–5]: имеется два и более блочных трансформатора и КРУЭ, расположенное на удалении от блочных трансформаторов, при этом соединение между ними выполнено двумя и более кабельными линиями длиной порядка сотен метров, а именно, 880 м [3], 630 м [4] и 216 м [5]. Характер отказов и особенности схемы выдачи мощности этих гидроэлектростанций говорят в пользу версии резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов как наиболее вероятной причины повреждений блочных трансформаторов.

Необходимо также отметить, что, к сожалению, в последнее время в отечественной энергетике все чаще стали применяться новые технические решения без должной проработки и проведения всесторонних исследований вопросов их применения. Не стало исключением и упомянутое совместное применение КРУЭ и кабельных линий из сшитого полиэтилена, которое несет в себе ряд «подводных камней», с которыми ранее отечественная электроэнергетика не сталкивалась.

Краткая характеристика резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов. Сущность резонансных перенапряжений в обмотках. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов по сути своей близки к резонансным перенапряжениям в длинных линиях в режиме стоячих волн [6, 7]. Но в отличие от длинных линий, обмотки имеют значимую электрическую и магнитную связи между отдельными частями обмотки (витками, катушками), которые качественно видоизменяют результирующие распределения напряжений в обмотках.

Эти электрические и магнитные связи определяются значениями взаимных емкостей и индуктивностей элементов обмоток и зависят в первую очередь от типа обмотки, например, винтовая, многослойная цилиндрическая (слоевая), катушечная непрерывная или переплетенная. Наименьшая связь между удаленными частями обмотки характерна для винтовых и катушечных обмоток, поскольку в таких обмотках чем дальше электрически расположены между собой отдельные элементы обмотки, тем больше геометрическое расстояние между ними, а значит, меньше их взаимные емкости и индуктивности. В слоевых обмотках, напротив, имеется более существенная связь между электрически удаленными элементами, поскольку, например, в двух смежных слоях друг напротив друга оказываются витки, электрически не соединенные между собой. Как следствие, в катушечных обмотках наиболее отчетливо проявляется характерное для стоячих волн распределение напряжения вдоль обмотки на резонансных частотах [7, 8], и этому типу обмоток соответствуют наибольшие кратности резонансных перенапряжений внутри обмоток [7].

Далее приведено расчетное распределение напряжений вдоль непрерывной катушечной обмотки, содержащей 52 катушки по 10 витков в каждой, с заземленной нейтралью. Расчеты выполнены в программах ТТ и EMTLAB [9]. На рис. 1 показано распределение вдоль обмотки потенциалов на первых пяти собственных частотах обмотки ($f_1 - f_5$), а на рис. 2 – распределение градиентов потенциалов.

Как видно из рис. 1, максимальная кратность потенциала обмотки достигается на первой собственной частоте в середине обмотки (в пучности стоячей волны). С ростом номера собственной частоты увеличивается число максимумов (пучностей стоячих волн) в распределении потенциалов, но их амплитуда снижается. Из этого следует, что в общем случае по наибольшим воздействиям на главную изоляцию представляют интерес лишь первые собственные частоты.

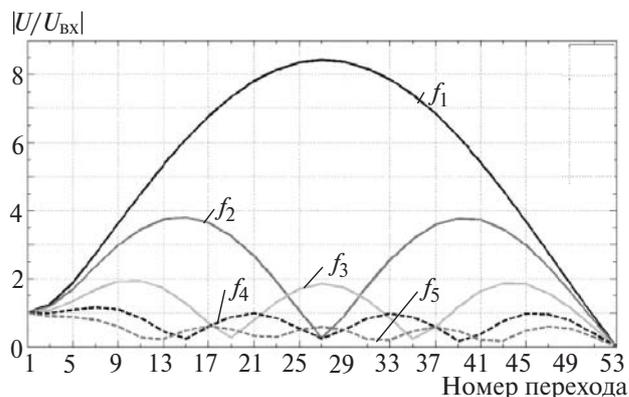


Рис. 1. Распределение потенциалов вдоль непрерывной катушечной обмотки

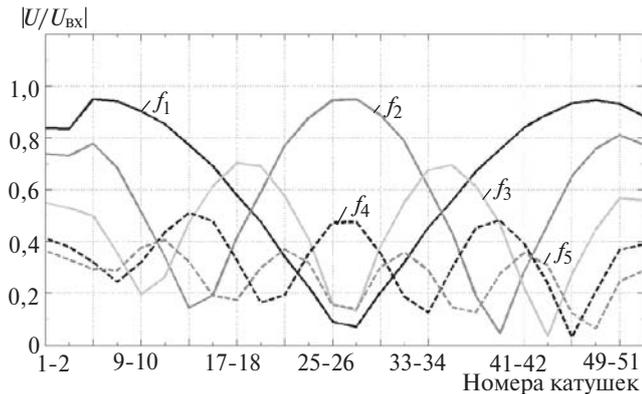


Рис. 2. Распределение градиентов потенциалов вдоль непрерывной катушечной обмотки

Из рис. 1 также следует, что максимальные значения производных потенциала, соответствующие максимальным воздействиям на продольную изоляцию обмотки, достигаются в узлах стоячих волн. Поскольку в случае заземленной нейтрали начало и конец обмотки являются узлами стоячих волн, во входных частях обмотки можно ожидать сравнительно большие значения градиентов потенциалов между катушками (рис. 2). При этом на первой собственной частоте большие градиенты имеют место только в начале и конце обмотки, на второй частоте — также и в середине обмотки, на третьей частоте — также и в области 1/3 и 2/3 электрической длины обмотки. Важно, что большие значения градиентов на второй и далее собственных частотах могут оказаться не только во входных зонах обмоток, изоляцию которых нередко выполняют усиленной по условию импульсной электрической прочности обмоток, но и в других промежуточных частях обмоток, где нет дополнительного усиления изоляции.

Необходимо отметить, что на амплитудные значения напряжений в пучностях стоячих волн и, как следствие, на значения потенциалов и градиентов потенциалов, воздействующих на главную и продольную изоляцию обмоток, оказывают значительное влияние емкость отдельных элементов обмотки на землю и потери энергии в трансформаторе. По этой причине меры, направленные на снижение потерь в трансформаторе, применительно к резонансным перенапряжениям носят негативный характер, поскольку снижение потерь приводит к увеличению воздействий на главную и продольную изоляцию обмоток.

В переплетенных обмотках за счет сильной связи между отдельными частями обмотки также возникают стоячие волны, но с существенно меньшими амплитудами колебаний и на более низких частотах.

Промежуточное положение занимают комбинированные обмотки и непрерывные обмотки с холо-

стыми витками. В них можно выделить такие характерные части обмотки, как входные части, имеющие увеличенную продольную емкость за счет переплетения или холостых витков, и части с непрерывной намоткой. В непрерывных частях таких обмоток также возможно возникновение стоячих волн на соответствующих этим частям собственных частотах. Но ввиду неоднородности обмотки и меньшей электрической длины непрерывной части обмотки амплитуды стоячих волн будут несколько меньше, чем в случае полностью непрерывной обмотки.

Типовые электрические схемы энергообъектов и коммутации, потенциально опасные в связи с возможностью развития резонансных перенапряжений. Необходимыми условиями для возникновения внутреннего резонанса в трансформаторе являются отсутствие нагрузки и наличие на питающей стороне колебаний напряжения с частотой, близкой к одной из собственных частот колебаний питаемой обмотки трансформатора.

Собственные частоты колебаний обмоток высшего и среднего напряжения трансформаторов средней и большой мощности составляют, как правило, десятки кГц. Одним из основных источников колебаний напряжения на таких частотах являются колебания в питающих кабельных или воздушных линиях длиной порядка сотен метров, вызванные многократными отражениями в этих линиях вследствие какой-либо коммутации. В связи с этим потенциальную опасность представляют электрические схемы, в которых включение трансформатора в сеть осуществляется совместно с питающей линией со стороны удаленного ее конца.

Можно выделить следующие типовые схемы энергообъектов и коммутации [10], вызывающие высокочастотные колебания напряжения в системе «питающая линия — трансформатор».

1. Короткое замыкание (КЗ) на землю одной из фаз в начале линии (в том числе на питающих шинах). На частоте порядка единиц—десятков килогерц обмотки трансформаторов относительно входных зажимов, как правило, имеют емкостный характер входного сопротивления, а полное входное сопротивление достаточно велико. Питающая линия оказывается в режиме, когда в ее начале — КЗ, а в конце линии — холостой ход. Многократные отражения бегущей волны, вызванной КЗ в начале линии, приведут к периодическому изменению напряжения на стороне трансформатора. Это напряжение вследствие наличия потерь в линии будет иметь характер затухающих колебаний.

2. Включение под напряжение системы «питающая линия — трансформатор» на шины, к которым подключено большое число линий с малым волно-

вым сопротивлением. Такое включение трансформатора под напряжение будет сопровождаться многократными отражениями в питающей линии и воздействием на трансформатор затухающего колебательного напряжения аналогично КЗ в начале питающей линии. Вместе с тем, в этом случае из-за наличия линий с малым волновым сопротивлением, отходящих от питающих шин и, как следствие, преломлений волн в точке подключения этих линий, следует ожидать меньших амплитуд и большего затухания колебаний по сравнению с предыдущим случаем КЗ на землю одной из фаз в начале линии.

3. Включение под напряжение системы «питающая линия – трансформатор» на шины, к которым подключена одна (или более) питающая линия с идентичными параметрами и близкой по значению длиной. По сравнению с предыдущим случаем такое включение характеризуется воздействием на трансформатор колебательного напряжения с меньшим затуханием, а потому потенциально является более опасным.

Затухание колебаний напряжения в сети играет важную роль в развитии опасных резонансных явлений в обмотках трансформаторов. Как было отмечено ранее, резонансные явления в обмотках имеют природу стоячих волн, сложение которых приводит к повышению напряжения. Для достижения предельных кратностей перенапряжений в обмотках необходимо продолжительное воздействие напряжения в течение времени, много большего, чем время пробега волны по обмотке. Время, требуемое для выхода в установившийся режим с предельными кратностями перенапряжений, составляет порядка десятков периодов воздействующего колебательного напряжения. Таким образом, при питании обмотки затухающим колебательным напряжением перенапряжения с предельными кратностями могут просто не успеть развиваться. Более того, чем больше затухание питающего напряжения, тем меньше будет возможная кратность резонансных перенапряжений.

В рассматриваемых системах «питающая линия – трансформатор» приближенная оценка доминирующей частоты колебаний может быть выполнена при решении следующего трансцендентного уравнения [9]:

$$f = \frac{v}{4L} \left(1 - \frac{2}{\rho} \arctan(2\rho f C_T Z_B) \right) \quad (1)$$

где v – скорость распространения волны в питающей линии; L – длина питающей линии; C_T – входная переходная емкость трансформатора; Z_B – волновое сопротивление питающей линии.

Из (1) следует, что доминирующая частота колебаний в рассматриваемой системе определяется в первую очередь параметрами питающей линии, а также входной переходной емкостью трансформатора, влияние которой тем больше, чем больше частота колебаний и волновое сопротивление линии. В случае линии большой длины и с низким волновым сопротивлением для приближенной оценки частоты колебаний последним слагаемым в выражении (1) можно пренебречь.

Пример. Рассмотрим повреждение блочного трансформатора типа ТЦ-400000/500 на Бурейской ГЭС. В 2006 г. на блочном трансформаторе № Т4 через год после ввода в эксплуатацию произошло аварийное отключение, вызванное межкатушечным замыканием в обмотке высшего напряжения фазы А. Версия о высокочастотных перенапряжениях рассматривалась в качестве одной из возможных причин [3, 11].

Особенностью электрической части электростанции является схема выдачи мощности в сеть 500 кВ (рис. 3), содержащая КРУЭ 500 кВ и два объединенных блока по два генератора и два трансформатора в каждом, которые связаны с КРУЭ кабельными линиями (КЛ) 500 кВ длиной 880 и 920 м. Из-за большого значения емкостного тока кабельных линий их коммутация выполняется соответствующими элегазовыми выключателями.

В 2009 г. специалистами НГТУ было выполнено осциллографирование напряжений на трансформаторе Т4 при коммутациях выключателями В3 и В4 [11, 12]. Во время проведения измерений генераторы Г5 и Г6 находились в работе, а генераторы Г3 и Г4 были выведены из работы. Таким образом, включение кабельной линии КЛ1 совместно с

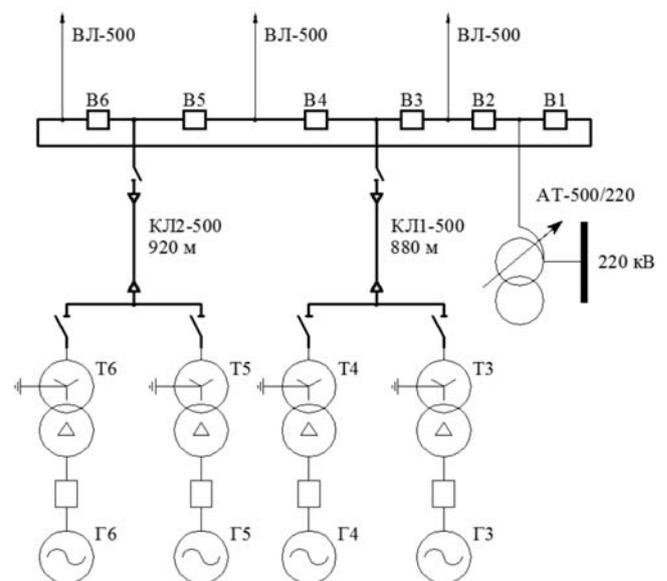


Рис. 3. Фрагмент главной схемы Бурейской ГЭС

трансформатором Т4 выполнялось при подключенной к шинам 500 кВ кабельной линии КЛ2, имеющей близкую к КЛ1 длину, что является одним из описанных ранее случаев, потенциально опасных из-за возможности развития резонансных напряжений в обмотках трансформаторов.

Из результатов проведенных работ следует, что измеренные амплитуды коммутационных перенапряжений значительно меньше испытательных напряжений блочного трансформатора, нормируемых по ГОСТ 1516.3–96 [13]. Вместе с тем, необходимо отметить, что форма полученных осциллограмм представляет интерес в части анализа возможных резонансных перенапряжений в обмотках блочного трансформатора Т4. Далее представлен более подробный анализ одной из характерных осциллограмм (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что процесс включения первого полюса элегазового выключателя В4 КРУЭ 500 кВ (фазы В) сопровождался более чем одним предпробоем его межконтактного промежутка (стрелки на рис. 4). При первом предпробое мгновенное значение напряжения между контактами

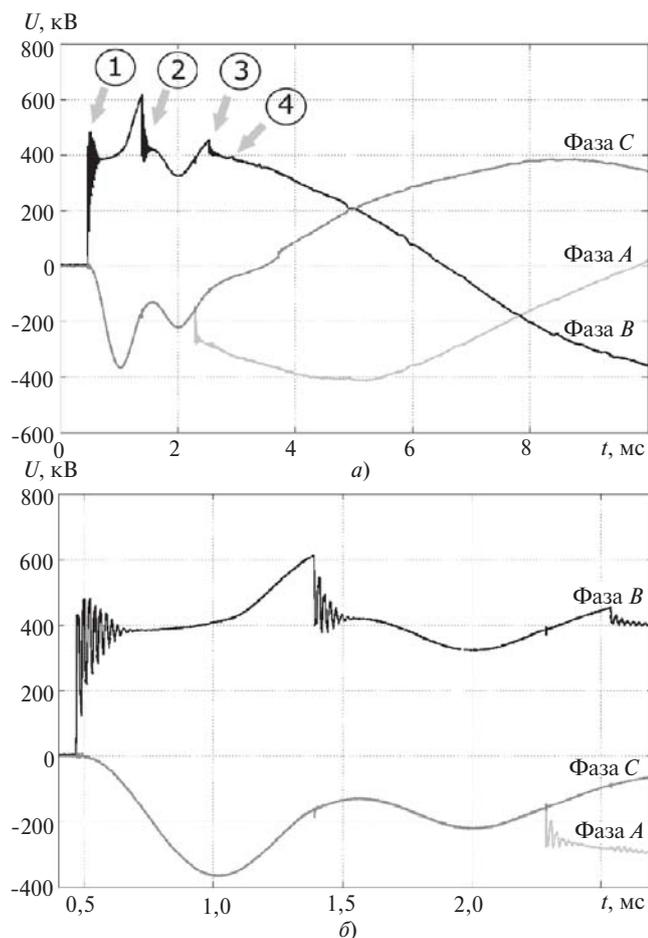


Рис. 4. Кривые напряжения на трансформаторе Т4 при включении выключателем В4 кабельной линии КЛ1 совместно с трансформатором Т4 [12]: а – в диапазоне 0–10 мс с момента включения; б – увеличенная начальная часть

составило около 400 кВ, при втором – около 200 кВ, при третьем – около 50 кВ, при четвертом – около 15 кВ. За каждым предпробоем следовали резкое изменение напряжения на стороне трансформатора Т4 с последующим колебанием с частотой около 45 кГц, вызванным многократными отражениями волн на участке сети, содержащем кабельные линии КЛ1 и КЛ2 и блочные трансформаторы Т4, Т5 и Т6.

Как видно из рис. 4, спустя некоторое время после каждого предпробоя в фазе В следовало «отключение» кабельной линии от шин 500 кВ, о чем говорит отклонение напряжения на фазе В трансформатора от синусоиды 50 Гц вплоть до момента времени 3 мс. Можно предположить, что причиной тому является многократное погасание дуги между контактами выключателя вследствие способности элегазовых выключателей отключать высокочастотный ток.

Таким образом, в рассматриваемом примере из-за возникновения предпробоев элегазового выключателя КРУЭ каждое включение блочного трансформатора совместно с кабельной линией приводит к воздействию на трансформатор серии затухающих колебательных напряжений с частотой, характерной для собственной частоты первичных обмоток силовых трансформаторов. При этом в первых сериях воздействий значение амплитуды колебательного напряжения оказывается сопоставимо с амплитудным значением фазного напряжения. Необходимо отметить, что рассматриваемые процессы включения элегазового выключателя с предпробоями межконтактного промежутка носят случайный характер, а потому амплитуды колебательных напряжений, воздействующих на трансформатор, также имеют случайный характер.

Возможные мероприятия против резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов. В отечественных нормативных документах, в частности [14–16], отсутствуют четкие рекомендации по защите силовых трансформаторов от резонансных перенапряжений, вызванных взаимодействием трансформаторов с электрической сетью.

Как и в случае наведенных на ненагруженные обмотки низшего напряжения трансформаторов перенапряжений резонансного характера [17], кардинальной мерой против резонансных перенапряжений является исключение возможности появления на первичной стороне трансформаторов колебательных напряжений с частотами, близкими к соответствующим резонансным частотам обмоток и передаточных функций, что может быть сделано на стадии проектирования электрической части энергообъекта.

Для защиты силовых трансформаторов от резонансных перенапряжений может быть применен комплекс мероприятий.

Схемно-технические и организационные мероприятия. 1. При выборе главных схем энергообъектов следует по возможности избегать применения схем, где выполняется коммутация силовых трансформаторов совместно с питающими кабельными линиями длиной порядка сотен метров, к шинам, к которым подключены идентичные кабельные линии близкой длины, или к шинам, к которым подключено большое число кабельных линий с малым волновым сопротивлением.

2. В случае невозможности исключения указанных в п.1 схем, как например в случае рассмотренной ГЭС, необходимо применение выключателей с предвключаемыми резисторами [1, 3]. Включение предвключаемого резистора в первые миллисекунды кардинально меняет ход переходного процесса многократных отражений волн в кабельных линиях, значительно снижает амплитуду колебаний и вносит дополнительное затухание напряжения на трансформаторе, тем самым исключает потенциально опасные воздействия на обмотки трансформаторов. Помимо этого, предвключаемый резистор существенно снижает броски токов включения трансформаторов [18] и, соответственно, электродинамические воздействия на обмотки и их изоляцию при каждом их включении под напряжение, что несомненно повышает надежность работы трансформаторов. Таким образом, действие предвключаемого резистора не ограничивается только лишь подавлением резонансных перенапряжений, а потому для электростанций, для которых характерны частые включения блочных трансформаторов, следует на нормативном уровне отметить необходимость оснащения элегазовых выключателей КРУЭ предвключаемыми резисторами.

3. В ряде случаев целесообразно предусмотреть последовательное включение отдельно кабельной линии и силового трансформатора.

4. Другим возможным техническим мероприятием является отстройка частоты колебаний системы «питающая кабельная линия – трансформатор» от резонансных частот первичной обмотки трансформатора. Из (1) следует, что для этого возможно применение следующих мер:

изменение длины кабельной линии L (оказывает сильное влияние на частоту колебаний, но не всегда экономически оправдано);

изменение скорости распространения волны v применением другой марки кабеля (оказывает сильное влияние на частоту колебаний);

изменение волнового сопротивления Z_B применением другой марки кабеля (влияние тем больше, чем меньше длина кабельной линии);

увеличение эквивалентной емкости C_T подключением конденсаторов на первичной стороне трансформатора (может быть экономически оправданным для сетей среднего напряжения; влияние тем больше, чем меньше длина кабельной линии).

Проектирование трансформаторов с учетом возможных перенапряжений. Другим решением в комплексе мероприятий является проектирование трансформаторов таким образом, чтобы имеющие место в сети колебания напряжения, вызываемые взаимодействием трансформатора и электрической сети, не представляли угрозу для внутренней изоляции в контексте резонансных перенапряжений в обмотках. На практике это может быть реализовано путем выбора соответствующих типов и конструкций обмоток трансформаторов [13]. В контексте трансформаторов высокого, сверх- и ультравысокого напряжения это может быть отказ от применения таких типов обмотки высшего напряжения, как непрерывной, непрерывной с холостыми витками или комбинированной обмотки, и предпочтительное применение переплетенной обмотки.

В этом случае необходимо, чтобы заказчик на стадии размещения заказа в контрактной документации (в технических требованиях) указал на специфику применения и особенности эксплуатации запрашиваемых трансформаторов, чтобы изготовитель смог учесть эти детали в своем предложении. Необходимыми исходными данными для такого проектирования могут являться возможные доминирующие частоты колебаний напряжения и/или частотные спектры, полученные расчетным путем или экспериментально применительно к месту установки трансформаторов.

Выводы. 1. При взаимодействии трансформатора с внешней сетью в его обмотках могут возникать резонансные перенапряжения в случае, если частота колебаний напряжения в сети на его входных зажимах оказывается близкой к одной из собственных частот колебаний обмоток. При резонансных явлениях напряжение на отдельных элементах изоляции обмоток может быть сопоставимо с напряжением на входных зажимах обмоток, а потому традиционная защита трансформаторов от перенапряжений путем установки внешних ОПН не может в должной мере защитить от резонансных перенапряжений.

2. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов имеют ту же природу, что и резонансные перенапряжения в длинных линиях в режиме стоячих волн. В отличие от длинных линий обмотки имеют значимую электрическую и маг-

нитную связи между отдельными частями обмотки (витками, катушками), которые качественно видоизменяют результирующие распределения напряжений в обмотках.

3. Тип обмотки трансформатора (катушечная непрерывная, переплетенная, комбинированная и пр.) существенно влияет на возможные кратности резонансных перенапряжений и собственные частоты колебаний обмоток. Резонансным перенапряжениям в наибольшей степени подвержены непрерывные обмотки и обмотки, имеющие непрерывные части (комбинированные, с холостыми витками), а в наименьшей степени — переплетенные обмотки.

4. По условию развития резонансных перенапряжений потенциально опасными являются схемы, в которых трансформатор коммутируется совместно с питающей линией к шинам, к которым подключены идентичные кабельные линии близкой длины, или к шинам, к которым подключено большое число кабельных линий с малым волновым сопротивлением.

5. Применительно к резонансным перенапряжениям совместное применение элегазовых коммутационных аппаратов и кабельных линий является наиболее неблагоприятным, поскольку при коммутациях этих аппаратов возможны многократные предпробой межконтактного промежутка с последующим погасанием дуги, что приводит к многократному инициированию в системе «питающая кабельная линия — трансформатор» колебаний напряжения с большими амплитудами и раскачке резонансных перенапряжений в обмотках питаемого трансформатора.

6. Для исключения возможности развития резонансных перенапряжений целесообразно применение схемно-технических мероприятий, направленных на устранение колебаний напряжения на опасных частотах. Кардинальной мерой является применение предвключаемых резисторов, которое следует на нормативном уровне предусмотреть к обязательному применению на наиболее ответственных электростанциях и энергообъектах.

7. Альтернативой является проектирование трансформаторов с учетом возможных воздействий колебательного напряжения, что может быть выполнено, например, соответствующим выбором типа обмотки. В этом случае необходимо, чтобы заказчик на стадии размещения заказа указал в своей заявке на специфику применения и особенности эксплуатации заказываемых трансформаторов.

Автор выражает благодарность К.П. Кадомской, Ю.А. Лаврову, А.Г. Овсянникову и С.С. Шевченко за возможность использования в статье осциллограммы включения блочного трансформатора Бурейской ГЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **CIGRE Brochure 577A**, Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 1: Expertise. Joint Working Group A2/C4.39. — CIGRE, April 2014, 176 p.
2. **CIGRE Brochure 577B**, Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 2: Case Studies. Joint Working Group A2/C4.39. — CIGRE, April 2014, 124 p.
3. **Шейко П.А.** Трансформаторы высокого напряжения. Повреждения вследствие коммутационных перенапряжений. — Новости электротехники, 2013, № 1 (79): <http://www.news.elteh.ru/arh/2013/79/05.php>
4. **Xuzhu Dong, Sebastian Rosado, Yilu Liu et al.** Study of Abnormal Electrical Phenomena Effects on GSU Transformers. — IEEE Trans. on Power Delivery, July 2003, vol. 18, No. 3, pp. 835–842.
5. **Lu Tiechen, Zhang Bo.** Calculation of Very Fast Transient Overvoltages in GIS. — IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. — Dalian (China), 2005, pp. 1–5.
6. **Долгинов А.И.** Техника высоких напряжений в электроэнергетике. — М.: «Энергия», 1968, 464 с.
7. **Kress K., Konig D., Muller W.** Traveling waves as causes of internal resonance phenomena in coils and windings. — CIGRE session 1992, report 12–303.
8. **Soloot A.H., Hoidalén H.K., Gustavsen B.** Upon the improvement of the winding design of wind turbine transformers for safer performance within resonant overvoltages. — CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM, 8–14 September 2013, Zurich (Switzerland).
9. **Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V.** Approach to analysis of resonance phenomena and overvoltages due to interaction between power transformer and external network. — CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM, 8 – 14 September 2013, Zurich (Switzerland).
10. **Bjorn Gustavsen.** Study of Transformer Resonant Overvoltages Caused by Cable-Transformer High-Frequency Interaction. — IEEE Transactions on Power Delivery, April 2010, vol. 25, No. 2, pp. 770–779.
11. **Лавров Ю.А., Овсянников А.Г., Шевченко С.С., Шиллер О.Ю.** Перенапряжения при коммутации блочного трансформатора 500 кВ элегазовым выключателем. — Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2010, № 6, с. 24–27.
12. **Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Петрова Н.Ф., Овсянников А.Г., Шевченко С.С.** Электромагнитные переходные процессы, сопровождающие эксплуатацию вакуумных и элегазовых выключателей. — Сб. трудов V Междунар. научно-технической конф. «Высоковольтное коммутационное оборудование», Москва, 2009.
13. **ГОСТ 1516.3–96.** Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. — М.: Изд-во стандартов, 1998, 54 с.
14. **Правила устройства электроустановок. 7-е изд.** — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2011, 552 с.
15. **СО 153–34.20.501–2003.** Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (взамен РД 34.20.501–95). — М., 2003.
16. **РД 153–34.3–35.125–99.** Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (взамен РД 34.35.125–93). — М., 1999.
17. **Ларин В.С.** Наведенные перенапряжения на холостых обмотках трансформаторов: оценка напряжений и защитные мероприятия. — Электротехника, 2015, № 7, с. 51–58.
18. **Yokotsu K., Shirasaka Y., Ebisawa Y., Murakami H.** On-site measurement, suppressing and assessment of inrush current in a 1000 kV UHV transformer, with consideration of core saturation. — CIGRE session 2012, report A2-305.

Автор: Ларин Василий Серафимович окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней

изоляции силовых трансформаторов». Начальник отдела трансформаторов ФГУП ВЭИ, регулярный член и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в Исследовательском комитете А2 «Трансформаторы» СИГРЭ.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 11, pp. 33–40.

Resonance Overvoltages in Transformer Windings. Part 1. Conditions of Occurrence and Measures for Protection

LARIN Vasily Serafimovich (All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia) – Head of the Department, Regular member of the CIGRE Study Committee A2 «Transformers», Cand. Sci. (Eng.)

This paper reviews the conditions of appearance and main features of the resonant overvoltages in different types of transformer windings, as well as typical electrical schemes and switching having potential danger in connection with the resonant overvoltages. Practical example is presented which shows one potentially dangerous scheme and voltages affecting the transformer. Paper reviews and describes the measures for protection of windings of transformers against resonance overvoltages caused by the interaction with the electrical network.

Key words: transformers, resonance overvoltages, windings, vibration, overvoltage protection

REFERENCES

1. CIGRE Brochure 577A, Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 1: Expertise. Joint Working Group A2/C4.39. – CIGRE, April 2014, 176 p.
2. CIGRE Brochure 577B, Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 2: Case Studies. Joint Working Group A2/C4.39. – CIGRE, April 2014, 124 p.
3. Sheiko P.A. *Novosti elektrotekhniki – in Russ (Electrical Engineering News)*, 2013, No. 1 (79): <http://www.news.elteh.ru/arh/2013/79/05.php>
4. Xuzhu Dong, Sebastian Rosado, Yilu Liu et al. Study of Abnormal Electrical Phenomena Effects on GSU Transformers. – IEEE Trans. on Power Delivery, July 2003, vol. 18, No. 3, pp. 835–842.
5. Lu Tiechen, Zhang Bo. Calculation of Very Fast Transient Overvoltages in GIS. – IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. – Dalian (China), 2005, pp. 1–5.
6. Dolginov A.I. *Tekhnika vysokikh napryazhenii v elektroenergetike (Technics of high voltage in electric power)*. Moscow, Publ. «Energiya», 1968, 464 c.
7. Kress K., Konig D., Muller W. Traveling waves as causes of internal resonance phenomena in coils and windings. – CIGRE session 1992, report 12–303.
8. Soloot A.H., Hoidalén H.K., Gustavsen B. Upon the improvement of the winding design of wind turbine transformers for safer performance within resonant overvoltages. – CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM, 8 – 14 September 2013, Zurich (Switzerland).
9. Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V. Approach to analysis of resonance phenomena and overvoltages due to interaction between power transformer and external network. – CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM, 8 – 14 September 2013, Zurich (Switzerland).
10. Bjorn Gustavsen. Study of Transformer Resonant Overvoltages Caused by Cable-Transformer High-Frequency Interaction. – IEEE Transactions on Power Delivery, April 2010, vol. 25, No. 2, pp. 770–779.
11. Lavrov Yu.A., Ovsyannikov A.G., Shevchenko S.S., Shiller O.Yu. *Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – in Russ. (Electro. Electrical Engineering, Power Engineering, Electrical Engineering Industry)*, 2010, No. 6, pp. 24–27.
12. Kadomskaya K.P., Lavrov Yu.A., Petrova N.F., Ovsyannikov A.G., Shevchenko S.S. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy, soprovozhdayushchiye ekspluatatsiyu vakuumnykh i elegazovykh vykluchatelei. – Sbornik trudov V Mezhdunarod. nauchno-tehnicheskoi konf. «Vysokovol'tnoye kommutatsionnoye oborudovaniye (Electromagnetic Transients Accompanying the Operation of Vacuum and SF6 Circuit Breakers. – Proceedings of the 5th International Scientific-Technical Conference «High-Voltage Switching Equipment»)*. Moscow, 2009.
13. GOST 1516.3–96. *Elektrooborudovaniye peremennogo toka na napryazheniye ot 1 do 750 kV. Trebovaniya k elektricheskoi prochnosti izolatsii (AC Electrical Equipment for Rated Voltages Ranging from 1 to 750 kV. Requirements for Electric Strength of Insulation)*. Moscow, Publ. Standards, 1998, 54 p.
14. *Pravila ustroystva elektroustanovok. 7-e izd. (Rules for Electrical Devices. 7 ed.)*. Moscow, Publ. NTs ENAS, 2011, 552 p.
15. SO 153–34.20.501–2003. *Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektricheskikh stantsii i setei Rossiiskoi Federatsii (vzamen RD 34.20.501–95) (The technical operation of power stations and networks in the Russian Federation (in exchange for RD 34.20.501–95))*. Moscow, 2003.
16. РД 153-34.3–35.125–99. *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setei 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazhenii (vzamen RD 34.35.125–93) (Guidelines for protection of electric networks 6–1150 kV against lightning and internal overvoltage (exchange for RD 34.35.125–93))*. Moscow, 1999.
17. Larin V.S. *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2015, No. 7, pp. 51–58.
18. Yokotsu K., Shirasaka Y., Ebisawa Y., Murakami H. On-site measurement, suppressing and assessment of inrush current in a 1000 kV UHV transformer, with consideration of core saturation. – CIGRE session 2012, report A2-305.

