

Резонансные явления в высоковольтных вводах с твёрдой полимерной изоляцией

- Беляев С. Г., ОАО “НТЦ ФСК ЕЭС”
- Львов Ю. Н.¹, доктор техн. наук, ОАО “НТЦ ФСК ЕЭС”
- Радковский С. Г., ОАО “НТЦ ФСК ЕЭС”

Данная статья посвящена исследованию мало изученных резонансных явлений в высоковольтных вводах, проявляющихся в процессе эксплуатации при высокочастотных импульсных воздействиях, в первую очередь, во вводах с твёрдой полимерной изоляцией. Для определения резонансных частот проведены измерения ёмкости и индуктивности, а также амплитудно-частотных характеристик вводов с RIP-изоляцией на классы напряжений 35, 110, 220, 330, 500 кВ. Предложены мероприятия, направленные на повышение надёжности работы высоковольтных вводов с твёрдой полимерной изоляцией.

Ключевые слова: высоковольтный ввод, твёрдая полимерная изоляция, резонанс, высокочастотное импульсное напряжение, RIP-изоляция.

В настоящее время в эксплуатации получили широкое распространение высоковольтные вводы с твёрдой полимерной изоляцией типа RIP. Изоляционный материал таких вводов, созданный на основе электроизоляционной бумаги и эпоксидного компаунда, обладает высокими электроизоляционными и механическими характеристиками, высокой химической и термической стойкостью, высокой стойкостью к действию частичных разрядов (ЧР). Применение таких вводов даёт возможность существенно снизить риски в эксплуатации, связанные с возникновением взрывов и пожаров маслонаполненного трансформаторного оборудования и опасных воздействий на окружающую среду.

Вместе с тем, выход из строя именно таких вводов как отечественного, так и зарубежного производства наблюдается в ряде случаев в период первых лет эксплуатации. Такая повреждаемость связана с недостаточной изученностью процессов и свойств, присущих данному виду изоляции и проявляющихся в условиях эксплуатации.

В значительной степени проблема надёжности высоковольтных вводов с твёрдой полимерной изоляцией определяется отсутствием в нормативно-технических документах ряда критериев, разработка которых должна быть направлена на получение более полной и достоверной информации для оценки их работоспособности. Необходимо подчеркнуть, что в результате фундаментальных научных исследований процессов в бумажно-масляной изоляции и её свойств были определены допустимые испытания и рабочие характеристики изоляции. В дальнейшем эти данные с учётом

опыта эксплуатации энергосистем, наладочных организаций и ремонтных заводов становились основой для нормативных и регламентирующих документов, определяющих требования к изоляции вводов. Подобных исследований по объёму и содержанию для вводов с твёрдой полимерной изоляцией отечественными производителями не проводилось, а результаты многолетних исследований зарубежных фирм по этой тематике не публикуются в открытых изданиях и являются их коммерческой тайной.

Данная статья посвящена исследованию мало изученных резонансных явлений, проявляющихся в процессе эксплуатации при высокочастотных импульсных воздействиях в первую очередь во вводах с твёрдой полимерной изоляцией и сопровождающихся, в ряде случаев, выходом из строя оборудования.

К числу наиболее опасных высокочастотных импульсных воздействий, определяющих электрическую прочность изоляции вводов, относятся атмосферные и внутренние перенапряжения в электрических системах. Эквивалентная частота, характеризующая процесс в пределах фронта волн при грозовых перенапряжениях, в 10^4 раз больше промышленной частоты [1]. В последнее время расширилось применение комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ). На высоковольтных подстанциях, снабжённых КРУЭ и имеющих кабельные связи, наблюдаются высокочастотные воздействия (перенапряжения с частотами до 10 МГц и более) на электротехническое оборудование, возникающие

¹ Львов Юрий Николаевич: timashova@ntc-power.ru

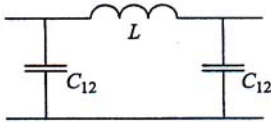


Рис. 1. Схема П-образной модели секции конденсаторной изоляции ввода:

L – индуктивность секции; C_{12} – половина значения ёмкости секции

при коммутациях элегазовых выключателей со срезами токов [2].

Нормированные испытательные напряжения грозовых и коммутационных импульсов установлены в [3]. При этом следует подчеркнуть, что приёмосдаточные испытания, которым подвергается каждый ввод на соответствие требованиям в части электрической прочности изоляции, по нормам МЭК более жёсткие [4], чем в российском стандарте [5]. В соответствии с [5], приёмосдаточные испытания включают испытания одноминутным напряжением промышленной частоты 50 Гц в сухом состоянии, в [4] помимо этого включены также испытания грозовыми импульсами.

Для анализа переходных электромагнитных процессов во вводах с неоднородной конденсаторной изоляцией наиболее общая модель изоляции представляет собой каскад из П-секций, параметры и число которых определяются длиной и диаметром обкладок [6]. На рис. 1 представлена П-образная модель секции конденсаторной изоляции согласно [6] для высоких частот.

Следует отметить, что изображённая на рис. 1 П-образная модель секции конденсаторной изоляции не отражает процессов проводимости в слоях диэлектрика, обусловленных сопротивлениями утечки диэлектрика и активными составляющими сопротивлений обкладок. Поэтому схема на рис. 1 должна быть дополнена активными сопротивлениями в виде сопротивлений, параллельно соединённых с ёмкостями C_{12} и последовательно – с индуктивностью L .

Как указано в [7], нередко удаётся проанализировать перенапряжения в схемах с помощью простейшего колебательного контура с параметрами r , L , C (рис. 2).

В простейшем колебательном контуре наблюдается резонанс напряжений. Резонансная частота в такой системе [8]

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

При резонансе напряжений или режимах, близких к нему, ток в цепи резко возрастает. Теоретически его значение стремится к бесконечности. С возрастанием тока увеличиваются напряжения на индуктивном и ёмкостных элементах, которые могут во много раз превысить напряжение источника

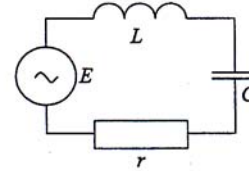


Рис. 2. Простейший колебательный контур

питания. Как правило, явление резонанса приводит к аварийным режимам вследствие появления больших перенапряжений и сверхтоков, на которые не рассчитаны элементы контура [9].

Собственную частоту ввода, при которой наступает резонанс, можно определить двумя способами. По первому способу необходимо измерить индуктивность L и ёмкость C ввода и, подставив эти значения в формулу (1), определить резонансную частоту в соответствии с моделью простейшего колебательного контура согласно рис. 2. По второму способу требуется построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ввода. Резонансная частота соответствует острому пику амплитуды напряжения АЧХ. Близкое совпадение резонансных частот, определённых двумя рассмотренными способами, служит критерием достоверности полученных результатов. К дополнительному критерию относится близкое совпадение индуктивного и ёмкостного сопротивлений на резонансной частоте $2\pi f_p L \approx \frac{1}{2\pi f_p C}$.

Для определения резонансных частот были проведены измерения ёмкости и индуктивности, а также АЧХ вводов с RIP-изоляцией на классы напряжений 35, 110, 220, 330, 500 кВ (по три ввода каждого класса напряжений).

С высокочастотного генератора Г4-158 (рис. 3) на ввод подавалось гармоническое переменное напряжение амплитудой 1 В в диапазоне частот от 4 до 300 МГц, реакция на которое фиксировалась высокочастотным вольтметром ВЗ-36. Измерение ёмкости C и индуктивности L производилось измерителем иммитанса Е7-15.

Амплитудно-частотные характеристики вводов напряжением 220 и 500 кВ представлены на рис. 4.

В результате проведённых измерений получены следующие значения параметров: для ввода 220 кВ $C = 890 \cdot 10^{-12}$ Ф, $L = 0,235 \cdot 10^{-6}$ Гн; для

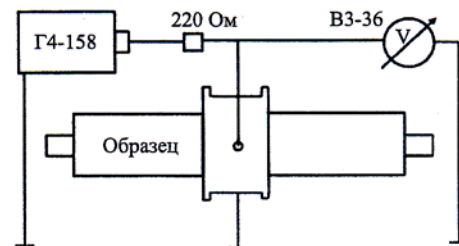


Рис. 3. Блок-схема измерения АЧХ остовов вводов

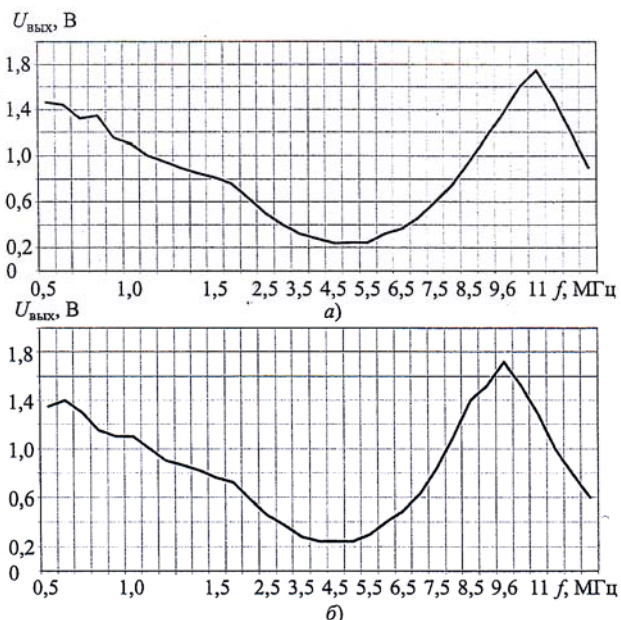


Рис. 4. АЧХ остова ввода на 220 (а) и 500 кВ (б)

ввода 500 кВ аналогичные показатели составили: $C = 967 \cdot 10^{-12}$ Ф, $L = 0,284 \cdot 10^{-6}$ Гн. После подстановки измеренных значений C и L в формулу (1) определено резонансное значение частоты: для вводов 220 кВ $f_p = 11$ МГц, для вводов 500 кВ $f_p = 9,6$ МГц. Индуктивное и ёмкостное сопротивление на частоте 11 МГц $X_L = 16,23$ Ом и $X_C = 16,26$ Ом практически равны, на частоте 9,6 МГц $X_L = 17,12$ Ом, $X_C = 17,15$ Ом так же практически равны. АЧХ, изображённые на рис. 4, имеют резонансный характер и наглядно показывают зависимость резонансных частот от класса напряжения вводов: чем выше класс напряжения, тем ниже резонансная частота.

Резонансные частоты, соответствующие острым пикам напряжений на графиках АЧХ, а также рассчитанные по результатам измерений L и C вводов практически совпадают. Близкое совпадение резонансных частот, полученных двумя различными способами, а также близкое совпадение индуктивных и ёмкостных сопротивлений на этих частотах свидетельствуют о достоверности полученных значений резонансных частот.

Для исследования воздействий напряжений с частотами, превышающими рабочую частоту 50 Гц, были взяты 12 образцов различных видов твёрдой полимерной изоляции вводов, выполненных из различных композитных материалов разными производителями. На образцы подавалось напряжение от специально изготовленного высоковольтного генератора с амплитудой порядка 40 кВ в диапазоне частот от 100 Гц до 30 кГц. При таком воздействии между электродом и образцом уже на частоте свыше 150 Гц появлялась дуга, которая с увеличением частоты стабилизировалась (фотографии представлены на рис. 5). На частотах

до 200 Гц поверхностный пробой образцов не носил деструктивного характера (рис. 5, а, б, в, г). Причём, на частотах свыше 20 кГц наблюдался сквозной пробой (рис. 5, к, л). Образцы RIP-изоляции импортного производства и образец на основе алюмосиликатов более стойки к высоковольтному высокочастотному воздействию. Деструкция диэлектрика этих образцов носит поверхностный характер (рис. 5, м, н).

Следует отметить большую уязвимость высоковольтных вводов с полимерной изоляцией при воздействии частичных разрядов по сравнению с вводами с бумажно-масляной изоляцией. Высоковольтные вводы с бумажно-масляной изоляцией обладают, в частности, свойством “самовосстановления”: в месте частичного пробоя происходит разрушение слоя проводящей обкладки и частичное восстановление первоначальной диэлектрической прочности изоляции. Масло способно поглощать и растворять весьма значительное количество газа, поэтому масляная среда оказывает сильное деионизирующее действие на разрядный канал. Образовавшиеся в результате разложения масла искровым разрядом частички угля и пузырьки газа постепенно растворяются в объёме масла, не сказываясь существенно на электрической прочности бумажно-масляной изоляции. Подобная способность к “самозалечиванию” – характерная особенность жидких диэлектриков с относительно малой вязкостью [7].

Иной механизм имеет место в твёрдой полимерной изоляции. Для такой изоляции при воздействии опасных напряжений могут возникать ЧР, и повреждение получает накопительный эффект, приводящий к замыканию обкладок и, как следствие, тепловому пробую. При импульсных воздействиях тепловой пробой в ряде случаев может стать причиной повреждения ввода. Если тепловой режим не является определяющим, то таким фактором могут быть критические ЧР на краях обкладок [10].

Вероятность резонансных явлений во вводах с твёрдой изоляцией определяется присутствием в спектре высоковольтных перенапряжений частот, равных собственным частотам вводов и их гармоник. Как показали исследования, выполненные в данной работе, собственные частоты ввода, при которых возможен резонанс напряжений, в зависимости от класса напряжения ввода лежат в диапазоне от 5 до 60 МГц. Присутствие в спектре высокочастотных перенапряжений этих частот делает потенциально возможным возникновение резонанса, при котором комплексное сопротивление изоляции ввода падает до нескольких десятков ом, что приводит к микропробую изоляции. Микропробой изоляции, как показывает практика исследований причин повреждений вводов, представляют собой тонкие игольчатые сквозные отверстия от трубы ввода до заземлённой обкладки остова,

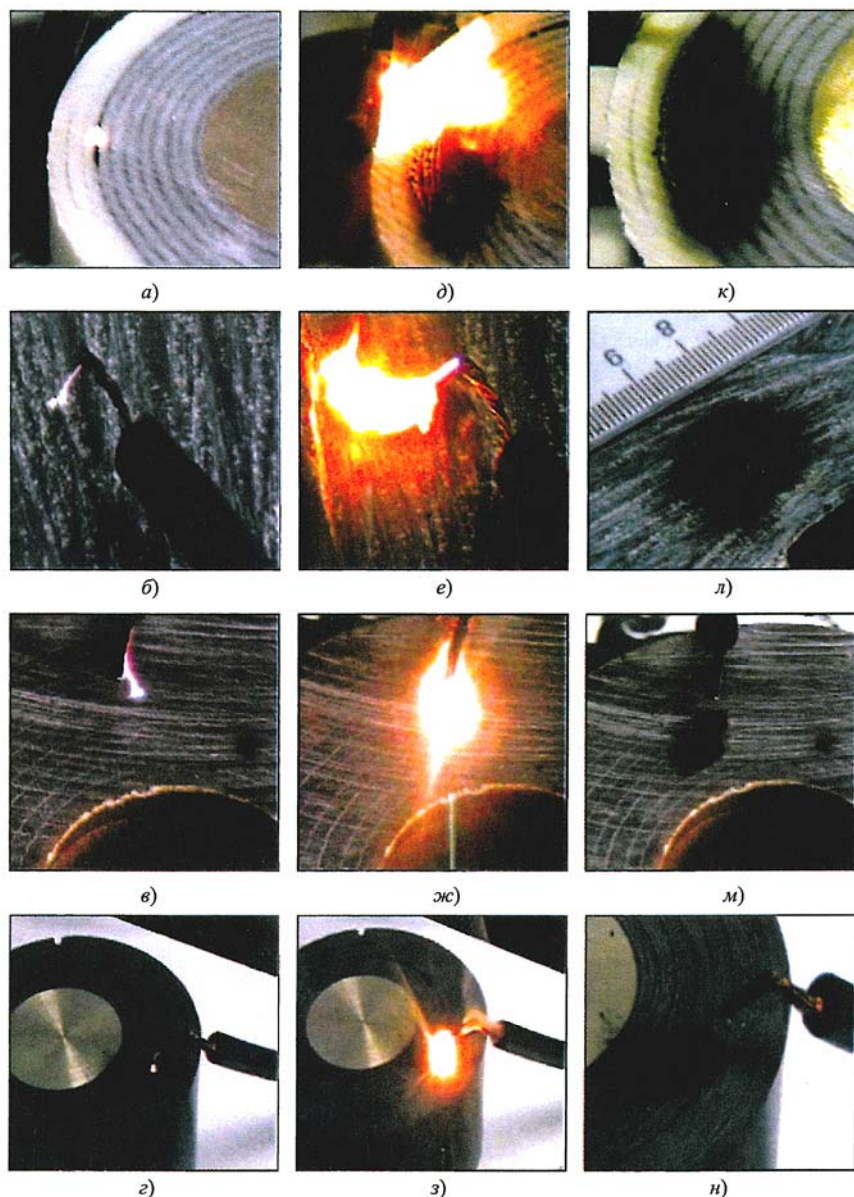


Рис. 5. Испытание образцов твёрдой полимерной изоляции при приложении напряжения 40кВ разной частоты:
а – г – частота 150 Гц; *д – з* – частота 20 кГц; *к – н* – частота свыше 20 кГц

как правило, в районе фланца, где расположен измерительный ПИН-вывод. Индуктивность заземлённого во время эксплуатации ПИН-вывода вместе с ёмкостями ввода формирует цепь, в которой так же может возникнуть резонанс напряжений [11, 12]. Образующиеся в результате микропробоев тонкие игольчатые сквозные отверстия снижают электрическую прочность изоляции основания ввода и создают предпосылки для возникновения силовой электрической дуги под рабочим напряжением на частоте 50 Гц.

Для повышения надёжности работы высоковольтных вводов с твёрдой полимерной изоляцией типа RIP необходим комплексный подход, включающий:

создание физико-химически совместимого композиционного материала, устойчивого к дейст-

вию ЧР и обладающего необходимой пластичностью, который должен быть испытан на долговременную стойкость к частичным разрядам (на радиационную стойкость по ГОСТ 27603 и ГОСТ 11262 [13 – 15]);

применение для изготовления уравнивающих обкладок материала, имеющего минимально возможное электрическое сопротивление;

разработку рекомендаций по подавлению резонансных явлений.

Выводы

1. В высоковольтных вводах с твёрдой полимерной изоляцией типа RIP в эксплуатации могут иметь место резонансные явления, приводящие к микропробою изоляции, что может вызвать повре-

ждение остова ввода и возникновение силовой электрической дуги на частоте 50 Гц под рабочим напряжением.

2. Конструкция ввода с твёрдой полимерной изоляцией типа RIP должна быть разработана с учётом снижения вероятности возникновения резонансных явлений.

Список литературы

1. *Базуткин В. В., Дмоховская Л. Ф.* Расчёты переходных процессов и перенапряжений. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. *Ковалев В. Д., Макаревич Л. В.* Перспективные разработки высоковольтного электротехнического оборудования. – ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2010, № 1.
3. *ГОСТ 1516.3-96.* Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. М.: Изд-во стандартов, 1998.
4. 60137: 1995. Insulated Bushing for Alternating Voltages Above 1000 V.
5. *ГОСТ 10693-81.* Вводы конденсаторные герметичные на номинальные напряжения 110 кВ и выше. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1981.
6. *Raghu Ram A., Amarnath J., Kavakshiah S.* Estimation of Fast Transients over Voltages on Bushing connected in GIS. – International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 2012, February, v. 4.
7. *Долгинов А. И.* Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968.
8. *Калашиников Э. Г.* Курс общей физики: электричество. М.: Наука, 1977.
9. *Основы теории цепей / Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. М.: Энергоатомиздат, 1989.*
10. *РД 153-34.3-35.125-99.* Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1999.
11. *Simulation of Capacitively Graded Bushing for Very Fast Transients Generated in a GIS during Switching Operations / Rao M. M., Rao T. P., Ram S. S., Singh B. P. – Journal of Electrical Engineering, 2008, No. 1, v. 3.*
12. *Modeling and measurements of VFT properties of a Transformer to GIS Bushing / Johansson K., Gdfvert U., Eriksson G., Johansson L. – CIGRE-2010, p. A2-302.*
13. *Принципы оптимизации состава компаундов для изготовления остовов высоковольтных вводов с RIP-твёрдой изоляцией / Селиверстов А. Ф., Комаров В. Б., Ершов Б. Г., Лютко Е. О., Короткова М. П., Львов М. Ю., Кассихин С. Д., Климашевский И. П., Сипилкин К. Г., Славинский А. З., Львов Ю. Н. – Материалы IX Международного симпозиума “Электротехника 2030”, 2007, 29 – 31 май, доклад 4-50.*
14. *ГОСТ 27605-88.* Материалы электроизоляционные. Классификация по радиационной стойкости. М.: Изд-во стандартов, 1988.
15. *ГОСТ 11262-80.* Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1986.