

2. КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 110-750 кВ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН

Руководство [1] является первым отечественным нормативным документом, в котором затронуты вопросы методов расчета ОПН при коммутационных перенапряжениях. Разработанная С.С. Шуром методика расчета ОПН, согласно [1], должна включать в себя:

- расчет статистического распределения амплитуд неограниченных перенапряжений в точке установки ограничителя;
- расчет статистического распределения ресурса, расходуемого ограничителем в течение одного года;
- определение ожидаемого срока службы ограничителя.

Согласно [1] на основе рассчитанных токовых нагрузок на ОПН при всех возможных коммутациях ВЛ определяется требуемый ресурс ОПН $T_{\text{треб}}$, который сравнивается с располагаемым $T_{\text{расп}}$ для рассматриваемого типа ОПН. Достаточными будут характеристики того ОПН, располагаемый ресурс которого будет выше требуемого. В [1] отмечается, что значения располагаемого ресурса задаются техническими условиями на ОПН, и в качестве примера приведены численные значения $T_{\text{расп}}$ для ограничителей, изготавливаемых НПО “Электрокерамика” (Санкт–Петербург). В ТУ на выпускаемые в настоящее время ОПН нет такого параметра ОПН как $T_{\text{расп}}$, а способы получения $T_{\text{расп}}$ для любого ОПН в [1] не приводятся, что делает невозможным использование [1], не говоря уже о сложности и объеме требуемых испытаний и вычислений. Поэтому следует признать, что методика [1] в настоящее время не востребована и вряд ли получит применение в будущем.

Указания [24] являются еще одним российским нормативным документом, в котором затрагиваются вопросы выбора ОПН для ограничения коммутационных перенапряжений. Основное внимание в [24] уделено применению весьма упрощенного графоаналитического способа для получения величины импульсного тока в ОПН в режиме ограничения коммутационных

перенапряжений, однако при этом нет никаких рекомендаций относительно способов нахождения длительности протекания импульсного тока, которая совместно с амплитудой определяет выделяющуюся в ОПН энергию, являющуюся основой для выбора ОПН. В [24] нет достаточных рекомендаций относительно выбора схемы для расчета коммутационных перенапряжений, необходимости учета тех или иных влияющих на перенапряжения факторов, не указано способов расчета неограниченных коммутационных перенапряжений на оборудовании сетей различных классов номинального напряжения и необходимости в тех или иных случаях установки ОПН для защиты от коммутационных перенапряжений.

Учитывая изложенное относительно [1,24], можно сказать: в России нет современной методики обоснованного выбора характеристик ОПН, предназначенных для ограничения коммутационных перенапряжений, что в ряде случаев может привести к неверным техническим решениям. Прежде всего, это касается определения расчетным путем необходимости установки ОПН на конце присоединенных к подстанции линий (непосредственно на линии до ее выключателя), так как если ПУЭ [3] регламентирует обязательную установку ОПН у силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов, то рекомендаций относительно необходимости установки ОПН на концах присоединенных ВЛ (что особенно актуально для классов 500-750 кВ) в ПУЭ нет.

В дальнейшем защитный аппарат, устанавливаемый в конце воздушной линии для защиты ее изоляции и изоляции присоединенного к ней оборудования (трансформатора напряжения, выключателя ВЛ, конденсатора связи и проч.) от коммутационных перенапряжений будем называть защитным аппаратом, устанавливаемым в линейную ячейку ВЛ. Такой защитный аппарат прекрасно совмещает функции ограничения как коммутационных, так и грозовых перенапряжений (см. первую главу) на оборудовании линейной ячейки.

Во многих зарубежных странах с учетом необходимости ограничения как грозовых, так и коммутационных перенапряжений в линейных ячейках всех присоединенных ВЛ устанавливаются ОПН, которые совместно с ОПН у силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов в подавляющем большинстве случаев полностью решают проблемы ограничения грозовых и коммутационных перенапряжений на изоляции всего оборудования подстанций до безопасных уровней.

В настоящее время энергетика России переходит к рыночным отношениям с потребителями, что приводит к необходимости повышения надежности работы электроустановок. Расчеты перенапряжений и зарубежный опыт свидетельствуют о том, что установка ОПН в линейные ячейки присоединенных ВЛ позволит практически исключить риск повреждения дорогостоящего высоковольтного оборудования ПС от грозовых и коммутационных перенапряжений и должна быть рекомендована отечественными нормативными документами. В случае установки ОПН в линейные ячейки присоединенных ВЛ важнейшим становится вопрос о достаточности пропускной способности по току и поглощаемой энергии ОПН, обеспечивающих надежную работу ОПН в течение всего срока его эксплуатации. В России устанавливают ОПН, но лишь в некоторые линейные ячейки 330-750 кВ, однако отсутствие в России единых подходов к расчету коммутационных перенапряжений приводит к существенному различию необходимых характеристик по пропускной способности и поглощаемой ОПН энергии, определенных различными инженерами в сходных схемно-режимных ситуациях.

Ниже упрощенно аналитически и при подробном компьютерном моделировании процессов оценены необходимые токовые и энергетические характеристики ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений, сформулированы требования по остающемуся напряжению ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений. Согласно [35] наибольшие коммутационные перенапряжения возникают на разомкнутом конце

односторонне питаемых ВЛ 110-750 кВ, и, следовательно, наибольшие токовые и энергетические нагрузки на ОПН 110-750 кВ возникают при их установке на ВЛ 110-750 кВ. Поэтому далее при анализе коммутационных перенапряжений в сетях основное внимание уделено коммутациям ВЛ 110-750 кВ, а особое внимание – сетям 500-750 кВ, в которых рассмотрен вопрос о необходимости установки ОПН 500-750 кВ в линейные ячейки.

Расчеты выделяющихся энергий в ОПН при их установке на ВЛ ранее выполнялись проф. Г.Н. Александровым и приведены в [32]. Соискатель изменил форму представления результатов расчетов, сделав ее более наглядной. Кроме того, соискателем:

- систематизированы подходы к выбору расчетных схем и схемно-режимных ситуаций, определяющих максимальные требования к ОПН по току пропускной способности на прямоугольных импульсах и удельной энергии;
- указаны факторы, учет которых является важным при расчетах коммутационных перенапряжений и нагрузок на ОПН;
- показано, что практически для всех сетей 220-750 кВ необходима установка ОПН в линейные ячейки;
- проведены расчеты по методике МЭК [33,36];
- проанализировано понятие класса разряда линии по МЭК;
- сопоставлены результаты аналитических расчетов и компьютерного моделирования.

2.1. Ограничение коммутационных перенапряжений в сетях 110-750 кВ

В [12] для всего оборудования сетей 330-750 кВ введены два класса изоляции: «А» – при применении ОПН для защиты оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений, «Б» – при применении вентильных разрядников. Появление двух классов изоляции «А» (облегченная) и «Б» (полная) вызвано тем, что при замене вентильных разрядников на ОПН предполагалось достичь более глубокого ограничения коммутационных (и грозовых) перенапряжений на оборудовании вплоть до кратностей 1.6-1.8 о.е. по отношению к амплитуде фазного наибольшего рабочего напряжения сети, что могло быть использовано для снижения требований к изоляции [37]. В качестве испытательных воздействий основного оборудования ПС 110-750 кВ в [12] названы:

- одноминутное напряжение промышленной частоты (табл.2.1);
- полный (табл.2.2) и срезанный грозовые импульсы напряжения;
- коммутационный импульс напряжения (табл.2.3).

Таблица 2.1. Одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты для изоляции силовых трансформаторов (автотрансформаторов).

$U_{ном}, \text{кВ}$		110	220	330	500	750
$U_{исп}, \text{кВ}$	защита РВ	200	325	460	630	800
	защита ОПН	200	325	395	570	750

Таблица 2.2. Амплитуда коммутационного импульса при испытаниях изоляции силовых трансформаторов (автотрансформаторов).

$U_{ном}, \text{кВ}$		110	220	330	500	750
$U_{исп}, \text{кВ}$	защита РВ	--	--	950	1230	1550
	защита ОПН	--	--	850	1050	1425

Таблица 2.3. Амплитуда грозового импульса при испытаниях изоляции силовых трансформаторов (автотрансформаторов).

$U_{ном}, \text{кВ}$		110	220	330	500	750
$U_{исп}, \text{кВ}$	защита РВ	480	750	1050	1550	2100
	защита ОПН	480	750	950	1300	1800

Современные ОПН ограничивают коммутационные перенапряжения до уровня 1.8-2.0, а грозовые – до уровня 2.0-2.2, т.е. до большего уровня, чем предполагалось при введении класса изоляции «А». Дальнейшее снижение кратностей ограниченных ОПН перенапряжений возможно за счет увеличения нелинейных свойств варисторов, однако вряд ли целесообразно с точки зрения надежности работы самих ОПН, если учесть существующие в сетях квазистационарные перенапряжения.

Замена разрядников на современные ОПН действительно приводит к снижению перенапряжений в месте установки ОПН, но, как было показано, замена РВ на ОПН практически не снижает уровней грозовых перенапряжений на оборудовании линейных ячеек, если в них не установлен ОПН. Кроме того, замена РВ на ОПН не изменит коммутационных перенапряжений на оборудовании линейной ячейки, если в ней не установлен ОПН, так как при коммутации ВЛ со стороны «системы» (одностороннее включение) подстанционные ОПН оказываются отделенными разомкнутым выключателем. Поэтому на подстанции, в целом, разрядники могут быть заменены на ОПН, но это вовсе не означает, что в линейных ячейках допустимо применять оборудование с изоляцией класса «А», однако ГОСТ это допускает.

При изготовлении оборудования существуют наработанные конструкторские решения, опробованные многими годами успешной эксплуатации, и, поэтому, снижение испытательных напряжений оборудования по [12] практически не изменило стоимости оборудования.

Учитывая изложенное, представляется несколько преждевременным снижение по [12] испытательных напряжений оборудования при замене разрядников на ОПН. Снижение испытательных напряжений действительно было бы обоснованным, если бы в России в обязательном порядке устанавливали ОПН в линейные ячейки присоединенных ВЛ, так как только в этом случае на всем оборудовании подстанций удастся достаточно глубоко ограничить грозовые и коммутационные перенапряжения. Строго говоря,

проверка возможности использования оборудования с облегченной изоляцией в условиях конкретной подстанции должна осуществляться расчетным путем.

В табл.2.4 по данным [35], близким к [36], приведены расчетные кратности коммутационных перенапряжений в сетях 110-750 кВ, т.е. те кратности, которые с достаточным запасом не превосходят испытательного напряжения оборудования. По данным табл.2.2 испытательное напряжение трансформатора 500 кВ составляет 1230 кВ (класс «Б»), что при амплитуде 428 кВ фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети 500 кВ соответствует кратности испытательного напряжения $1230/428 = 2.9$ о.е.

Таблица 2.4. Расчетная кратность коммутационных перенапряжений.

Номинальное напряжение, кВ	110	220	330	500	750
Расчетная кратность перенапряжений	3.1	2,7	2,7	2,5	2,1

В эксплуатации согласно табл.2.4 допустима кратность $K = 2.5$, что соответствует запасу в 15% относительно испытательного напряжения оборудования. Как видно, в [35] достаточным считается запас 15%, который является общепринятым для оборудования 110-750 кВ, что отражено в [24]. Согласно [24] защитные характеристики устанавливаемых ОПН 110-750 кВ в режиме ограничения коммутационных перенапряжений должны быть такими, чтобы ограниченные действием ОПН коммутационные перенапряжения с достаточным запасом (15-20%) не превосходили испытательного напряжения защищаемого оборудования, указанного в [12]. Именно обеспечение такого запаса является основным критерием для обоснования необходимости установки ОПН и выбора его остающегося напряжения в режиме ограничения коммутационных перенапряжений.

Реальные коммутационные перенапряжения в сетях 110-750 кВ имеют статистическую природу [1,35,36], однако подавляющее большинство коммутационных перенапряжений в сетях 110-750 кВ имеют кратность ниже

3.0. Именно это с учетом данных табл.2.4, отражающих свойства изоляции оборудования 110-750 кВ, привело к тому, что в России ограничением коммутационных перенапряжений в сетях 110-220 кВ (и 330 кВ) практически не занимались. Принимая во внимание все ту же статистическую природу коммутационных перенапряжений, отказ от ограничения коммутационных перенапряжений в сетях 110-220 кВ является спорным вопросом, который частично разрешился при замене вентильных разрядников на ОПН.

Если в сетях 330-750 кВ применялись разрядники типов РВМГ и РВМК, последние из которых предназначены в том числе для ограничения коммутационных перенапряжений на оборудовании, то для сетей 110-220 кВ разрядники для ограничения коммутационных перенапряжений вообще не выпускались, а искровые промежутки разрядников РВС и РВМГ были отстроены от срабатывания при коммутационных перенапряжениях, т.е. действительно коммутационные перенапряжения в этих сетях считались не опасными для оборудования и не рассматривались. Замена в сетях 110-220 кВ разрядников РВС и РВМГ на современные ОПН означает, что теперь возникающие коммутационные перенапряжения будут принудительно ограничиваться установленными ОПН. Учитывая высокую расчетную кратность коммутационных перенапряжений (табл.2.4) в сетях 110-220 кВ, установка ОПН 110-220 кВ с любой типовой вольтамперной характеристикой будет достаточной для исключения опасных коммутационных перенапряжений на оборудовании. Поэтому особых требований к защитным характеристикам устанавливаемых ОПН 110-220 кВ в режиме ограничения коммутационных перенапряжений можно не предъявлять, однако следует обратить внимание на места установки этих защитных аппаратов.

Наибольшие коммутационные перенапряжения зачастую возникают на присоединенных ВЛ 110-750 кВ и, следовательно, воздействуют на подстанционное оборудование линейных ячеек. Поэтому именно оборудование линейных ячеек, по всей видимости, является наименее защищенным от коммутационных перенапряжений, так же, как и от грозových.

Согласно [1] наиболее опасные коммутационные перенапряжения возникают на разомкнутом конце ВЛ в следующих расчетных случаях:

1. при плановом включении ВЛ (рис.2.1);
2. при включении ВЛ на однофазное короткое замыкание в ее конце (рис.2.2);
3. при подаче напряжения на отключенную фазу ВЛ при повторном включении в цикле успешного ОАПВ (рис.2.3);
4. при включении ВЛ в цикле ТАПВ (рис.2.4);
5. при аварийном разрыве передачи при асинхронном ходе (рис.2.5).

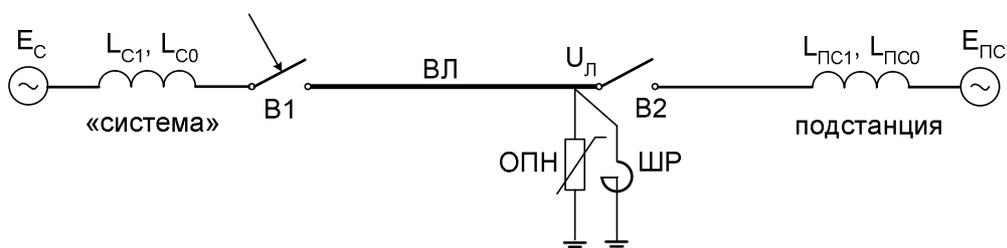


Рис.2.1. Операция планового включения ВЛ.

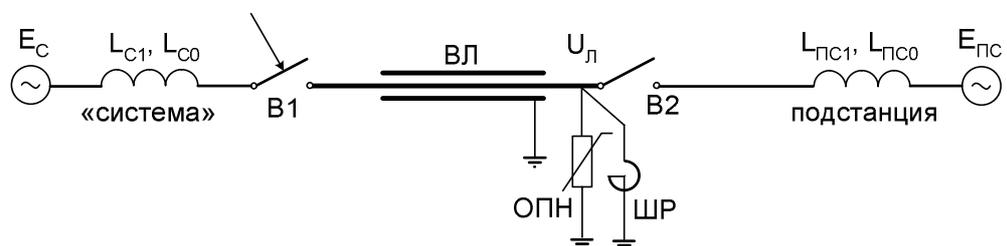


Рис.2.2. Включение ВЛ на однофазное к.з. в ее конце.

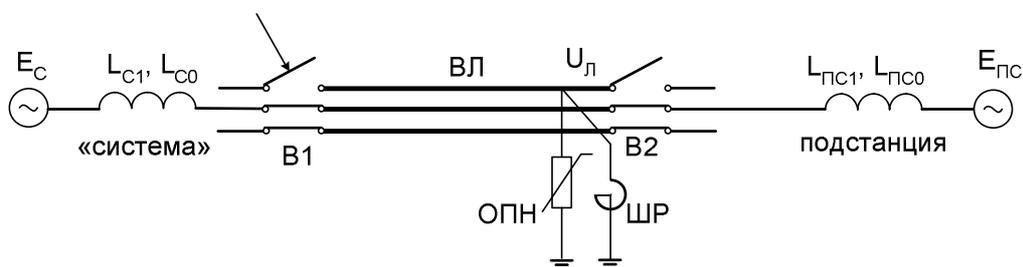


Рис.2.3. Повторное включение ВЛ в цикле ОАПВ.

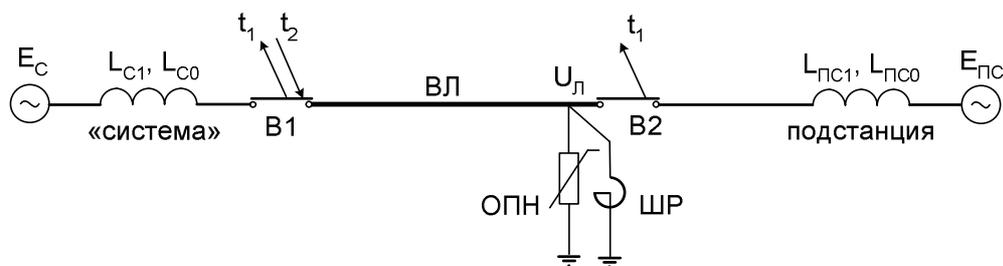


Рис.2.4. Повторное включение ВЛ в цикле ТАПВ.

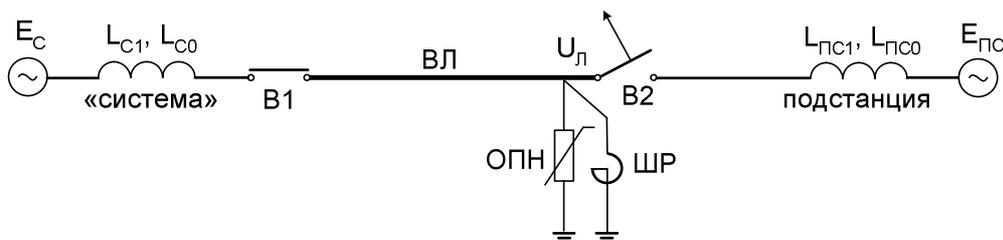


Рис.2.5. Разрыв ВЛ вследствие асинхронного хода.

В обобщенных схемах рис.2.1-2.5 в конце ВЛ условно показаны ОПН и шунтирующий реактор, тогда как для большинства линий это оборудование отсутствует (указанные ранее кратности коммутационных перенапряжений соответствуют случаю отсутствия ОПН в линейной ячейке). «Система» и подстанция в расчетах учитываются своими эквивалентными эдс и индуктивностями по прямой и нулевой последовательностям.

Некоторые из схем рис.2.1-2.5 являются расчетными лишь для определенных классов номинального напряжения: ОАПВ и асинхронный ход являются расчетными случаями лишь для ВЛ 330-750 кВ, а ТАПВ – для ВЛ 110-220 кВ. Случай включения ВЛ на однофазное короткое замыкание (рис.2.2) возможен либо при плановом включении ВЛ, либо при повторном включении ВЛ в цикле неуспешного ТАПВ. Единственный режим, в котором возникающие на оборудовании линейной ячейки коммутационные перенапряжения $U_{л}$ зависят от эквивалента подстанции, – это режим аварийного разрыва передачи (рис.2.5), наибольшие перенапряжения в котором возникают тогда, когда угол на передаче максимален (180 градусов), что возможно при отключении асинхронного хода.

На основе проведения расчетов в схемах рис.2.1-2.5 (без учета ОПН) для ВЛ 110-750 кВ можно определить максимальные возникающие коммутационные перенапряжения (их кратность) на оборудовании линейных ячеек и далее, с использованием данных табл.2.4, определить необходимость установки в линейную ячейку защитного ОПН:

- если хотя бы в одном из расчетных случаев кратность возникающих коммутационных перенапряжений больше, чем указано в табл.2.4 для оборудования рассматриваемого класса номинального напряжения, то необходима установка ОПН в линейную ячейку;
- если ни в одном из расчетных случаев кратность возникающих коммутационных перенапряжений не превосходит указанных в табл.2.4 значений для рассматриваемого класса номинального напряжения, то установка ОПН не требуется (по условиям защиты от коммутационных перенапряжений, но не от грозových).

В схемах рис.2.1-2.5 так же могут быть определены токовые и энергетические воздействия на ОПН в случае, если будет подтверждена необходимость его установки в линейную ячейку. С использованием найденных воздействий производится выбор конкретного типа ОПН, удовлетворяющего условиям эксплуатации в рассматриваемой точке сети.

В [38] при помощи инженерной формулы

$$U_{Л}^{МАКС} = 2U_{КОН} - U_{НАЧ}$$

проведен анализ коммутационных перенапряжений на оборудовании линейной ячейки при коммутациях ВЛ:

- при повторном пробое межконтактного промежутка при отключении холостой ВЛ (этот случай не рассмотрен на рис.2.1-2.5) максимальные коммутационные перенапряжения достигают кратности 3.0;
- при трехфазном автоматическом повторном включении максимальные коммутационные перенапряжения существенно зависят от наличия присоединенного к ВЛ оборудования, но не превосходят 2.7-2.8 о.е.

- при отключении асинхронного хода максимальные коммутационные перенапряжения существенно зависят от угла между векторами эквивалентных ЭДС по концам линии и внутренних сопротивлений при этих ЭДС, но не превосходят 3.4 о.е. для случая линий большой длины и 3.0 о.е. для линий типовой длины.

Аналогично рассуждениям [38] можно показать, что:

- при плановом включении линии максимальные коммутационные перенапряжения не превосходят кратности 2.0;
- при включении на однофазное короткое замыкание максимальные коммутационные перенапряжения не превосходят кратности 2.5;
- при повторном включении в цикле ОАПВ максимальные коммутационные перенапряжения существенно зависят от начального напряжения на отключенной фазе (для ВЛ заданной длины от числа и мощности шунтирующих реакторов и наличия в нейтрали нулевого реактора) и не превосходят кратности 3.0.

Указанные максимально возможные кратности коммутационных перенапряжений получены на «холостом» конце ВЛ, тогда как на питающем конце коммутационные перенапряжения будут заметно ниже. Проведенный анализ максимальных кратностей коммутационных перенапряжений в сетях 110-750 кВ с учетом табл.2.4 и возможности тех или иных рассмотренных коммутаций для ВЛ различного номинального напряжения позволяет сделать следующий вывод: установка ОПН в линейные ячейки ВЛ по условиям защиты оборудования от коммутационных перенапряжений

- не требуется в сетях 110 кВ;
- рекомендуется в сетях 220-330 кВ;
- обязательна для сетей 500-750 кВ.

Этот вывод сформулирован на основе общих соображений и, поэтому, является обобщающим. Показано, что практически для всех сетей 220-750 кВ необходима или рекомендуется установка ОПН в линейные ячейки и,

следовательно, встает вопрос о токовых и энергетических характеристиках устанавливаемых ОПН, который рассмотрен ниже.

В некоторых случаях возможен отказ (по условиям коммутационных перенапряжений, но не грозových) от установки ОПН в линейные ячейки, так как возникающие коммутационные перенапряжения не представляют опасности для оборудования линейных ячеек, например, вследствие малой длины ВЛ, наличия на ней большого числа ШР (со своими ОПН). В таких случаях необходимо проведение обосновывающих расчетов, учитывающих специфику конкретной ВЛ и подстанции. Проведение компьютерных расчетов так же рекомендуется для всех ПС 500-750 кВ, учитывая их ответственность и относительную немногочисленность в энергосистеме.

2.2. Расчет импульсных токов и выделяющихся энергий при коммутационных перенапряжениях

Было отмечено, что в сетях 110-750 кВ наибольшие токовые и энергетические нагрузки на ОПН в подавляющем числе случаев возникают при коммутациях воздушных линий, а самые большие нагрузки – на ОПН линейных ячеек. При установке ОПН в линейную ячейку максимальная величина перенапряжений в месте размещения ОПН определяется остающимся напряжением, задаваемым при разработке ограничителя. Пренебрегая активными потерями энергии, а также энергией магнитного поля в индуктивности линии, можно считать, что ОПН должен поглотить энергию, равную разности энергий электрического поля линии при наибольшем перенапряжении и при остающемся напряжении. Энергия электрического поля линии при наибольшем напряжении равна

$$W_0 = \frac{1}{2} C U_{\max}^2,$$

где C – полная емкость фазы линии длиной l_l .

Соответственно, энергия электрического поля линии при остающемся напряжении равна

$$W_{осм} = \frac{1}{2} C U_{осм}^2.$$

Емкость линии

$$C = C_0 \cdot l_l = \frac{l_l}{v \cdot Z},$$

где Z – волновое сопротивление линии, v – скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии.

Энергия, поглощаемая ОПН при одном воздействии максимального перенапряжения:

$$W_{ОПН}^1 = W_0 - W_{осм} = \frac{1}{2} C (U_{\max}^2 - U_{осм}^2).$$

Энергия, рассеиваемая ОПН, равна

$$W_{ОПН}^2 = U_{осм} \cdot I_{онн} \cdot \Delta t,$$

где Δt – расчетное время протекания среднего тока $I_{OПН}$ через ОПН (импульс тока в ОПН заменяется прямоугольным импульсом той же длительности протекания, но «средней» амплитуды), т.е. время превышения максимальным неограниченным перенапряжением остающегося напряжения ОПН.

Время Δt можно оценить с использованием рис.2.6 как

$$U_{ocm} = U_{max} \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \omega_0 \Delta t\right),$$

где ω_0 – собственная частота колебаний напряжения на линии.

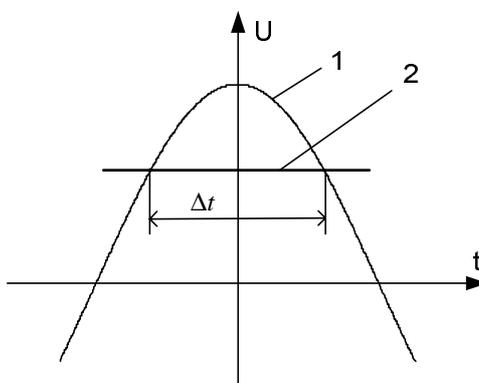


Рис.2.6. Определение времени превышения воздействующего на ОПН перенапряжения с амплитудой U_{max} (кривая 1) остающегося напряжения ОПН U_{ocm} (кривая 2).

Тогда

$$\Delta t = \frac{2}{\omega_0} \arccos\left(\frac{U_{ocm}}{U_{max}}\right).$$

Собственную частоту колебаний напряжения на линии без шунтирующих реакторов и учета эквивалентной индуктивности «системы» можно определить, исходя из времени пробега $t_{np} = \frac{l_l}{v}$ электромагнитной волны вдоль линии длиной l_l .

Получим

$$f_0 = \frac{1}{4t_{np}} = \frac{v}{4l_l},$$

откуда

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi v}{4l_a}$$

Записав равенство поглощаемой и выделяемой энергий ОПН $W_{ОПН}^1 = W_{ОПН}^2$, получим средний (за время его протекания) ток ОПН

$$I_{ОПН} = \frac{\frac{1}{2}C(U_{\max}^2 - U_{ост}^2)}{U_{ост} \cdot \frac{2}{\omega_0} \cdot \arccos\left(\frac{U_{ост}}{U_{\max}}\right)}$$

Введем следующие обозначения:

$$K_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_{нр}^{А,Ф}}$$

– кратность неограниченных перенапряжений, равная отношению амплитуды неограниченных перенапряжений и амплитуды фазного значения наибольшего длительно допустимого напряжения ОПН;

$$K_{ост} = \frac{U_{ост}}{U_{нр}^{А,Ф}}$$

– коэффициент остающегося напряжения, равный отношению остающегося напряжения на ОПН и амплитуды фазного значения наибольшего длительно допустимого напряжения ОПН.

Перепишем выражения для среднего тока в ОПН с учетом введенных обозначений и ряда подстановок и получим

$$I_{ОПН} = \frac{\pi}{8Z} \cdot U_{нр}^{А,Ф} \cdot \frac{K_{\max}^2 - K_{ост}^2}{K_{ост} \cdot \arccos\left(\frac{K_{ост}}{K_{\max}}\right)} \quad (2.1)$$

Поглощаемая (или выделяемая) в ОПН энергия

$$W_{ОПН} = \frac{l_a}{2vZ} \cdot (U_{нр}^{А,Ф})^2 \cdot (K_{\max}^2 - K_{ост}^2) \quad (2.2)$$

Энергоемкость ОПН – энергия, приведенная к действующему значению наибольшего длительно допустимого фазного напряжения. Следовательно, она может быть определена из выражения

$$W_{ОПН}^{уд} = \frac{W_{ОПН}}{U_{нр}^{Д,Ф}} = \frac{\sqrt{2} \cdot W_{ОПН}}{U_{нр}^{А,Ф}}$$

откуда

$$W_{\text{ОПН}}^{\text{уд}} = \frac{l_{\text{л}}}{\sqrt{2} \cdot \nu Z} \cdot U_{\text{нр}}^{\text{А,Ф}} \cdot (K_{\text{max}}^2 - K_{\text{ост}}^2). \quad (2.3)$$

Полученным значениям поглощаемых ОПН энергий можно поставить в соответствие амплитуду прямоугольного испытательного импульса тока длительностью 2 мс (2000 мкс):

$$I_{\text{ОПН}}^{2\text{мс}} = \frac{W_{\text{ОПН}}}{U_{\text{ост}} \cdot 0.002} = \frac{W_{\text{ОПН}}}{K_{\text{ост}} \cdot U_{\text{нр}}^{\text{А,Ф}} \cdot 0.002},$$

откуда

$$I_{\text{ОПН}}^{2\text{мс}} = \frac{l_{\text{л}}}{0.004 \cdot \nu Z} \cdot U_{\text{нр}}^{\text{А,Ф}} \cdot \frac{(K_{\text{max}}^2 - K_{\text{ост}}^2)}{K_{\text{ост}}}. \quad (2.4)$$

Проанализируем полученные выражения (2.1)-(2.4), для чего предположим, что кратности неограниченных коммутационных перенапряжений для сетей различных классов напряжения одинаковы и составляют величину $K_{\text{max}} = 3.5$. Такая кратность в [1] рекомендуется к использованию в расчетах при отсутствии исходных данных и, как было показано выше, является практически «максимально возможной» для ВЛ.

Будем считать коэффициент остающегося напряжения (кратность ограниченных коммутационных перенапряжений) не зависящим от класса напряжения сети и примем его $K_{\text{ост}} = 1.8$, что для ОПН 110-220 кВ даст завышенные токовые и энергетические нагрузки на варисторы, так как для типовых ОПН этих классов $K_{\text{ост}} > 1.8$.

Из выражения (2.1) следует, что величина среднего тока в ОПН в режиме ограничения возникающих коммутационных перенапряжений не зависит от длины линии; при увеличении напряжения сети растет чуть быстрее этого напряжения, так как с ростом напряжения сети происходит некоторое снижение волнового сопротивления фазных проводов ВЛ. Если средний импульсный ток в ОПН не зависит от длины линии, то и неограниченные коммутационные перенапряжения практически не зависят от длины линии, которая влияет лишь на форму (длительность) возникающих перенапряжений.

Из выражения (2.2) следует, что величина энергии, поглощаемой ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений, пропорциональна длине линии; при увеличении напряжения сети растет чуть быстрее квадрата этого напряжения.

Из выражения (2.3) следует, что величина удельной энергии, поглощаемой ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений, пропорциональна длине линии; при увеличении напряжения сети растет чуть быстрее этого напряжения.

Из выражения (2.4) следует, что амплитуда испытательного импульса прямоугольного тока длительностью 2000 мкс пропорциональна энергоемкости ОПН, т.е. точно также зависит от длины линии и напряжения сети.

Наиболее важными являются величины удельной поглощаемой ОПН энергии и тока пропускной способности ОПН (прямоугольный импульс тока длительностью 2000 мкс), поэтому далее приведены результаты расчетов только по формулам (2.3) и (2.4).

Для надежной работы ОПН его наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение должно быть несколько выше наибольшего длительно допустимого напряжения сети, в которую он устанавливается (см. [24]). В оценочных расчетах по (2.3) и (2.4) будем считать, что длительно допустимые напряжения ОПН и сети совпадают.

Исходные данные для расчетов приведены в табл.2.5, а результаты расчетов, проведенных по формулам (2.3) и (2.4), при варьировании длины линии для сетей различных номинальных напряжений приведены в табл.2.6-2.7. На основе данных табл.2.6-2.7 построены зависимости от длины ВЛ требуемой энергоемкости и токов пропускной способности ОПН, предназначенных для установки в линейные ячейки ВЛ различных классов номинального напряжения (рис.2.7-2.8). В табл.2.6-2.7 и на рис.2.7-2.8 диапазон длин $0 \div 700$ км коммутируемых участков линий для наглядности условно принят одинаковым для ВЛ 110-750 кВ, тогда как реальные возможные длины участков ВЛ различных номинальных напряжений указаны в табл.2.8.

Таблица 2.5. Исходные данные для расчета по формулам (2.3) и (2.4)

$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
$U_{пр}^{сети}$, кВ	126	252	363	525	787
$U_{пр}^{А,Ф}$, кВ (ампл., фазн.)	103	206	296	429	643
Z , Ом	400	400	300	290	260
K_{max} , о.е.	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
$K_{ост}$, о.е.	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8

Таблица 2.6. Результаты расчетов энергоемкости ОПН по формуле (2.3).

$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
Длина, км	$W_{ОПН}^{уд}$, кДж/кВ				
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.5	1.1	2.1	3.1	5.2
200	1.1	2.2	4.2	6.3	10.5
300	1.6	3.3	6.3	9.4	15.7
400	2.2	4.4	8.4	12.6	21.0
500	2.7	5.5	10.5	15.7	26.2

Таблица 2.7. Результаты расчетов тока пропускной способности на прямоугольных импульсах 2000 мкс по формуле (2.4).

$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
Длина, км	$I_{ОПН}^{2мс}$, А				
0	0	0	0	0	0
100	107	215	412	617	1031
200	215	429	824	1233	2062
300	322	644	1236	1850	3093
400	429	858	1648	2466	4124
500	536	1073	2061	3083	5155

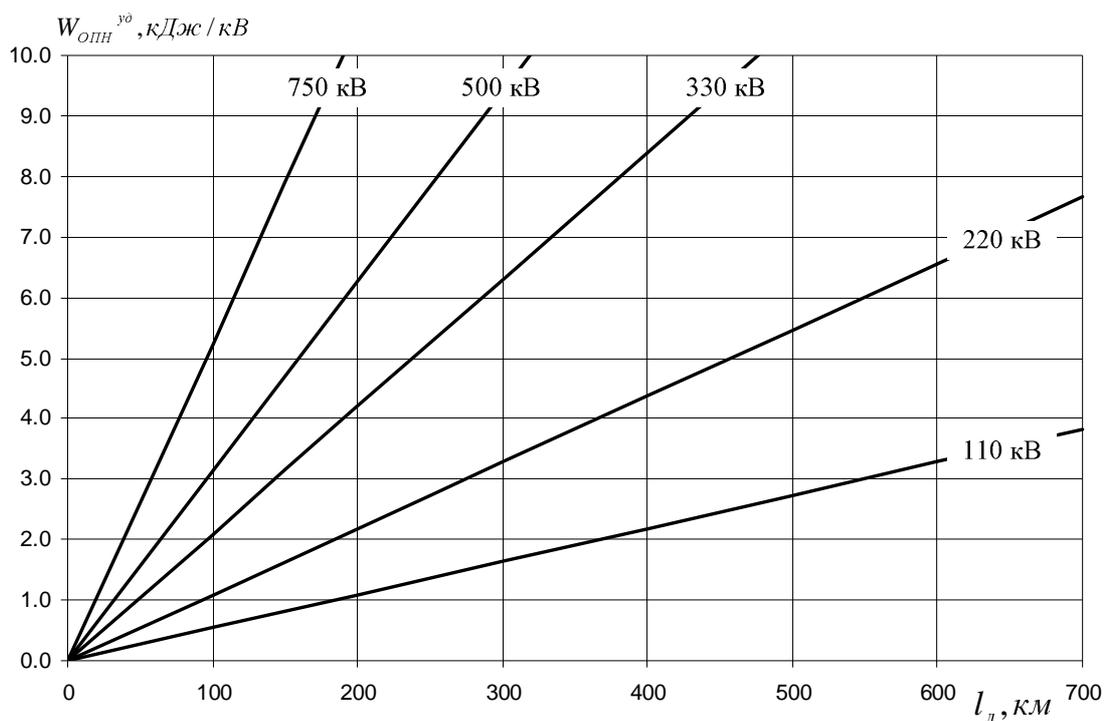


Рис.2.7. Удельная энергоёмкость ОПН, предназначенных для установки на ПС различных номинальных напряжений, при варьировании длины присоединенных линий.

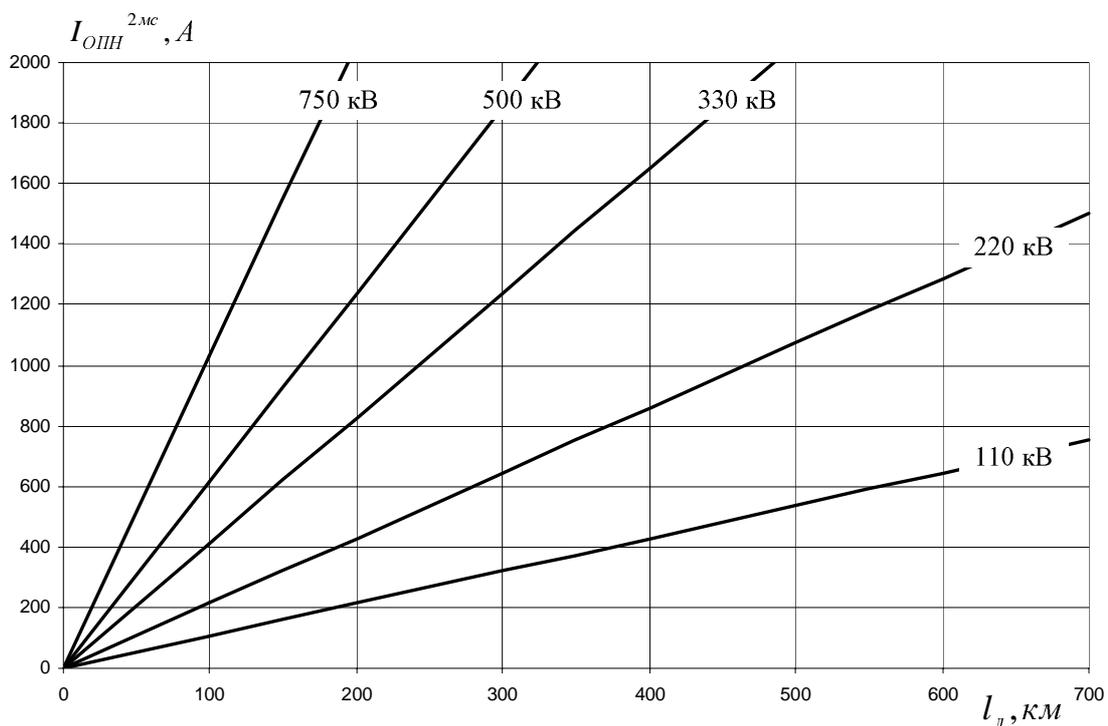


Рис.2.8. Ток пропускной способности ОПН, предназначенных для установки на ПС различных номинальных напряжений, при варьировании длины присоединенных линий.

Типовые значения токов пропускной способности ОПН, производимых современной промышленностью [1,24], лежат в диапазоне 300÷2500 А и

определяются диаметром рабочих элементов ОПН – варисторов, увеличению диаметра которых соответствует увеличение тока пропускной способности ОПН. Нижняя граница диапазона типовых значений токов пропускной способности обусловлена тем, что в ОПН 110-750 кВ не применяются варисторы диаметром меньше 41 мм, а верхняя граница диапазона типовых значений токов пропускной способности является технологическим пределом.

На основе данных табл.2.6-2.7 и соответствующих им рис.2.7-2.8 составлена сводная табл.2.8, в которой указаны типовые длины участков линий различных классов напряжения и соответствующие им токи пропускной способности ОПН.

Таблица 2.8. Величины наиболее вероятных токов пропускной способности ОПН, устанавливаемых на ПС различных классов напряжения.

$U_{\text{ном}}$, кВ	Длина участка ВЛ, км	$I_{\text{ОПН } 2000\text{мкс}}$, А	$W_{\text{уд}}$, кДж/кВ
110	100	107	0.5
220	200	429	2.2
330	200	824	4.2
500	300	1850	9.4
750	200	2062	10.5

В табл.2.8 длины участков ВЛ 500-750 кВ указаны такими, при которых на ВЛ еще не устанавливают шунтирующих реакторов. Если длины участков ВЛ 500 и 750 кВ превосходят 300 км то, как видно из табл.2.8, к ОПН 500-750 кВ предъявляются слишком высокие требования, но при таких длинах на ВЛ 500-750 кВ уже устанавливаются шунтирующие реакторы (защищенные своими ОПН), которые, помимо решения прочих задач, позволяют снизить воздействия на ОПН, установленные в линейных ячейках, оставив их характеристики на уровнях указанных в двух последних строках табл.2.8. Несмотря на формальный запрет коммутаций “длинных” ВЛ 500-750 кВ без присоединенных к ним реакторов, известны случаи, когда производились

коммутации ВЛ 500-750 кВ длин, больших указанных в табл.2.8. В подобных ситуациях возможны повреждения ОПН, которые и были зафиксированы в ряде случаев (ВЛ 500 кВ «ПС Новокузнецкая – С.-Ш. ГЭС», ВЛ 750 кВ «ПС Владимирская – Калининская АЭС»).

Определим выделяемую в ОПН энергию с использованием методики МЭК [33,36], которая базируется на применении формулы

$$(W_{\text{ОПН}})_{\text{МЭК}} = \frac{U_n - U_{\text{ост}}}{Z} \cdot U_{\text{ост}} \cdot 2T \cdot n, \quad (2.5)$$

где $U_{\text{ост}}$ – остающееся напряжение на ОПН при воздействии на него перенапряжений U_n ; $T = l/v$ – время распространения волны по линии (мкс), зависящее от длины линии l (км) и от скорости распространения волны v (км/мкс); n – количество последовательно, через малые (с точки зрения возможности ограничителя рассеять поглощенную энергию) интервалы времени, воздействующих перенапряжений; значение n обычно принимают равным 2, учитывая возможности проведения АПВ и повторных зажиганий дуги в выключателях устаревших конструкций.

Перепишем эту формулу с учетом введенных ранее обозначений

$$(W_{\text{ОПН}})_{\text{МЭК}} = \frac{K_{\text{max}} \cdot U_{\text{нр}}^{A,\Phi} - K_{\text{ост}} \cdot U_{\text{нр}}^{A,\Phi}}{Z} \cdot (K_{\text{ост}} \cdot U_{\text{нр}}^{A,\Phi}) \cdot 2 \frac{l_{\text{л}}}{v} \cdot n,$$

приведем к виду

$$(W_{\text{ОПН}})_{\text{МЭК}} = \frac{2l_{\text{л}}}{vZ} \cdot (U_{\text{нр}}^{A,\Phi})^2 \cdot (K_{\text{max}} - K_{\text{ост}}) \cdot K_{\text{ост}} \cdot n.$$

Удельная энергоёмкость ОПН, приведенная к наибольшему длительно допустимому напряжению, имеет вид

$$(W_{\text{ОПН}}^{\text{уд}})_{\text{МЭК}} = \frac{(W_{\text{ОПН}})_{\text{МЭК}}}{U_{\text{нр}}^{D,\Phi}} = \frac{\sqrt{2} \cdot (W_{\text{ОПН}})_{\text{МЭК}}}{U_{\text{нр}}^{A,\Phi}}.$$

Тогда

$$(W_{\text{ОПН}}^{\text{уд}})_{\text{МЭК}} = 2\sqrt{2} \frac{l_{\text{л}}}{vZ} \cdot U_{\text{нр}}^{A,\Phi} \cdot (K_{\text{max}} - K_{\text{ост}}) \cdot K_{\text{ост}} \cdot n.$$

Найдем отношение энергоемкостей, предлагаемых формулой (2.3) и методикой МЭК. Получим

$$\frac{W_{ОПН}^{y\delta}}{(W_{ОПН}^{y\delta})_{МЭК}} = \frac{1}{4n} \cdot \frac{K_{\max} + K_{ост}}{K_{ост}}$$

При используемых в расчетах значениях $K_{\max} = 3.5$ и $K_{ост} = 1.8$ имеем

$$(W_{ОПН}^{y\delta})_{МЭК} = (4 \cdot n) \cdot \frac{K_{ост}}{K_{\max} + K_{ост}} \cdot W_{ОПН}^{y\delta} = (1.36 \cdot n) \cdot W_{ОПН}^{y\delta}.$$

Видно, что методика МЭК, использующая упрощенную расчетную схему, дает существенно завышенные требования $(W_{ОПН}^{y\delta})_{МЭК}$ по энергоемкости ОПН (при $n=1$) по сравнению с ранее найденным $W_{ОПН}^{y\delta}$. Методика МЭК даст одинаковые с ранее предложенной методикой результаты лишь при $K_{\max} = (4n-1) \cdot K_{ост}$, однако выполнение этого условия соответствует нереально большим кратностям неограниченных перенапряжений.

В соответствии со Стандартом МЭК класс разряда линии для ограничителя может быть определен по типовым зависимостям удельной энергии от отношения остающегося на ОПН напряжения к его же номинальному напряжению [33]. После определения класса разряда линии:

- по табл.2.9 длительность тока пропускной способности ОПН (T_n), форма которого при испытаниях принимается прямоугольной;
- максимальное значение импульсов тока пропускной способности $I_{2000мс}$ (в А) по полуэмпирической формуле из [39] (исходные данные результаты расчетов указаны в табл.2.10)

$$I_{2000мс} = a \cdot (b + 0.08 \cdot C - 1.95). \quad (2.6)$$

Согласно [39] на практике ток пропускной способности рекомендуется выбирать на 5-25% выше минимальных значений $I_{2000мс}$, причем больший запас рекомендуется для ОПН более низких классов напряжений, а меньший – для ОПН высших классов напряжения.

Таблица 2.9. Класс разряда линии по МЭК.

Номинальный ток $I_{ном}$, А	Класс разряда линии (С)	Длительность прямоугольного импульса (T_p), мкс
10000	1	2000
10000	2	2000
10000	3	2400
20000	4	2800
20000	5	3200

Таблица 2.10. Токи пропускной способности ОПН 110-750 кВ по [39], определенные с учетом класса разряда линии.

$U_{ном}$ сети, кВ	110	220	330	500	750
Класс разряда линии	1	2	3	4	5
a	210	420	770	1250	2000
b	3.2	3.2	2.8	2.6	2.4
$I_{2000мкс}$, А	279	592	839	1213	1700

Требуемые токи пропускной способности ОПН 110-220 кВ по условиям ограничения коммутационных перенапряжений (табл.2.8) не превосходят величин 100-400 А, тогда как рекомендации [39] (табл.2.10), основанные на понятии класса разряда линии по МЭК, свидетельствуют о токах 300-600 А. С одной стороны, это может быть обусловлено отмеченной некорректностью формулы (2.5) для оценки энергии в ОПН при коммутационных перенапряжениях, а с другой стороны, вероятно, такие рекомендации МЭК – попытка учесть энергию, выделяющуюся в ОПН при грозовых перенапряжениях.

С учетом данных табл.1.7 (при 150 мкс) несложно показать, что требования к энергоемкости ОПН 110-220 кВ определяются не коммутационными перенапряжениями, а грозовыми. Учитывая это, а также рекомендации относительно дополнительного (на 25%) увеличения тока

пропускной способности ОПН более низких классов напряжения, логично предположить, что понятие класса разряда линии по МЭК является комплексным, т.е. учитывающим условия работы ОПН как при грозовых, так и при коммутационных перенапряжениях.

2.3. Методические подходы к расчету коммутационных перенапряжений

Расчеты коммутационных перенапряжений и нагрузок на ОПН можно проводить с использованием специализированных программ на компьютерах. Проведение компьютерных расчетов необходимо, прежде всего в нетиповых случаях, среди которых можно назвать, например, защиту от коммутационных перенапряжений конденсаторных батарей, устройств продольной емкостной компенсации. Проведение компьютерных расчетов целесообразно для подстанций высших классов номинального напряжения (500-750 кВ), как наиболее ответственных и дорогостоящих.

Ранее было показано, что максимальные коммутационные перенапряжения в сетях 110-220 кВ не требуют обязательной установки ОПН в линейные ячейки. Кроме того, было показано, что токовые нагрузки на ОПН 110-220 кВ при коммутационных перенапряжениях достаточно малы и не являются определяющими при выборе характеристик этих ОПН. Учитывая изложенное, рассчитывать коммутационные перенапряжения на оборудовании и вызванные ими нагрузки на ОПН 110-220 кВ в ОРУ 110-220 кВ типовых подстанций практически бессмысленно.

В сетях 330 кВ максимальные коммутационные перенапряжения при отключении асинхронного хода уже таковы, что вызывают необходимость установки ОПН в линейные ячейки, при этом токовые нагрузки на ОПН будут не более указанных в табл.2.6. Уточнение характеристик ОПН 330 кВ по сравнению с данными табл.2.6 не может быть существенным, практически не повлияет на стоимость ОПН и, следовательно, является нецелесообразным.

В сетях 500-750 кВ установка ОПН в линейные ячейки обязательна. В этих сетях, характеризующихся большими длинами ВЛ и наличием шунтирующих реакторов (и их ОПН), уточнение данных табл.2.6 для конкретных условий эксплуатации (длина, число ШР) в ряде случаев становится оправданным, так как иногда позволяет заметно снизить требования к энергоемкости и току пропускной способности ОПН, т.е. уменьшить стоимость оборудования.

Выше показано, что проведение расчетов коммутационных перенапряжений в сетях 110-750 кВ, содержащих воздушные линии, не является необходимым и не требуется, за исключением сетей 500-750 кВ.

2.3.1. Методика расчета коммутационных перенапряжений

Расчет коммутационных перенапряжений для выбора ОПН по пропускной способности и удельной поглощаемой энергии можно вести в различных схемах сети и ПС: в нормальном режиме, в различных ремонтных режимах, в пусковом режиме. Очевидно, что коммутационные перенапряжения, а также токовые и энергетические нагрузки на ОПН во всех перечисленных случаях будут различными. Нормативных документов, отдающих предпочтение какой-либо конкретной схеме для расчета коммутационных перенапряжений нет, и выбор расчетной схемы в каждом конкретном случае остается за расчетчиком [40].

Обеспечить «абсолютную» надежность защиты оборудования от коммутационных перенапряжений вполне реально: достаточно рассмотреть наиболее тяжелый случай из всех возникающих коммутационных перенапряжений, в котором определить требуемые параметры ОПН, тогда во всех прочих случаях нагрузки на ОПН и коммутационные перенапряжения на оборудовании будут ниже, т.е. менее опасны. Таким образом, задача выбора схемы для проведения расчетов коммутационных перенапряжений может быть сведена к поиску той схемно-режимной ситуации, в которой возникающие на оборудовании коммутационные перенапряжения приводят к максимальным токовым и энергетическим нагрузкам на ОПН.

Рассмотрим перенапряжения на ПС, соединенной с внешней системой посредством ВЛ. Расчетными случаями для ВЛ 500-750 кВ являются:

1. Включение ВЛ со стороны «системы» (схема рис.2.1-2.2). Наибольшие коммутационные перенапряжения на оборудовании линейной ячейки ВЛ 500-750 кВ рассматриваемой ПС будут возникать в том случае, когда внутренняя индуктивность «системы» будет максимально возможной.

Поэтому из возможных режимов работы «системы» нужно выбрать тот, в котором в работе находится кроме коммутируемой ВЛ минимум оборудования: например, 1-2 автотрансформатора или еще одна линия кроме коммутируемой.

2. Включение ВЛ в цикле ОАПВ (схема рис.2.3). Проварьировав угол на передаче и число присоединенных к отключенной фазе шунтирующих реакторов, можно найти то сочетание параметров, которое даст максимальные перенапряжения или максимальные токовые и энергетические нагрузки на ОПН.
3. Отключение асинхронного выключателем В2 (схема рис.2.5). Максимальные перенапряжения $U_{л}$ на оборудовании линейной ячейки ПС будут в том случае, когда эквивалентная индуктивность подстанции $L_{ПС1}$ и $L_{ПС0}$, используемая в расчетных схемах, минимальна, а эквивалентная индуктивность «системы» $L_{ПС1}$ и $L_{ПС0}$ максимальна, т.е. когда отключение асинхронного хода происходит вблизи наиболее мощной системы, роль которой выполняет рассматриваемая ПС. Поэтому необходимо рассмотреть только тот случай, в котором на рассматриваемой подстанции в работе находятся все присоединения, а в «системе» – минимальное число присоединений.

Индуктивные параметры прямой и нулевой последовательности «системы» и подстанции определяются в основном оборудованием, которое непосредственно присоединено к ОРУ 500-750 кВ, т.е. при получении эквивалента нет необходимости в учете оборудования, подключенного к стороне среднего и низкого напряжения силовых трансформаторов и автотрансформаторов 500-750 кВ.

В первой и третьей из перечисленных коммутаций (включение ВЛ и отключение асинхронного хода) необходимо учитывать разброс в работе полюсов выключателей разных фаз, так как он всегда имеет место, и при его учете перенапряжения и нагрузки на ОПН возрастают.

В случае если на рассматриваемом конце ВЛ установлены шунтирующие реакторы, то расчетным случаем достаточно считать тот, в котором на момент коммутации один из реакторов оказался выведен из работы.

Расчеты коммутационных перенапряжений в сетях 500-750 кВ имеют смысл для уточнения реальной необходимости установки ОПН в линейную ячейку и уточнения характеристик этого ОПН по сравнению с усредненными данными табл.2.6 (и табл.2.8). Поэтому результатами расчетов в трех перечисленных случаях, в которых учтено наиболее неблагоприятное сочетание индуктивных параметров «системы» и подстанции, будут:

- коммутационные перенапряжения. Если они опасны для оборудования, то необходима установка ОПН в линейную ячейку.
- токовые (амплитуда импульса тока) и энергетические (выделяющаяся энергия) нагрузки на установленные ОПН. Если они заметно отличаются от значений, указанных при упрощенных расчетах в табл.2.6 и табл.2.8, то возможно изменение требований к ОПН.

2.3.2. Ток или энергия ?

Некоторые авторы в качестве результатов указывают лишь амплитуду импульсного тока в ОПН, которую они зафиксировали в своих расчетах: например, в Указаниях [24] графоаналитическим способом определяется максимальный импульсный ток в ОПН, но нет определения длительности его протекания. Учитывая тот факт, что амплитуда импульса тока никак не связана с его длительностью, важнейшим результатом является выделяющаяся в ОПН энергия, которую необходимо определять в каждом из расчетов, так как именно превышение выделяющейся в ОПН энергии совершенно недопустимо, поскольку такое воздействие может привести к его повреждению. Превышение в ОПН амплитуды тока при перенапряжении над нормируемым значением не столь критично, как превышение энергии.

В этой связи, указывать только амплитуду тока в ОПН без указания энергии бессмысленно [40]. Амплитуда тока в ОПН может быть лишь

дополнительной иллюстрацией формы тока в ОПН, так как при известной энергии и токе можно вычислить условную длительность его протекания.

При заданной вольтамперной характеристике ОПН амплитуда импульсного тока в нем соответствует определенным неограниченным перенапряжениям в месте установки ОПН. Неограниченные перенапряжения в свою очередь зависят от всех параметров расчетной схемы и являются весьма чувствительными к разбросу срабатывания полюсов выключателя, к параметрам «системы», к способу моделирования коммутируемой ВЛ (с сосредоточенными параметрами или с распределенными, с частотными зависимостями погонных параметров или без них). Как показывают многочисленные расчеты, выделяющаяся в ОПН энергия заметно менее чувствительна к используемой в расчетах модели и во многом определяется лишь длиной линии, что говорит о выделяющейся энергии, как о том параметре, который удобно использовать при сравнении результатов расчетов, а также для их унификации.

2.3.3. Выбор ОПН на основе расчетов коммутационных перенапряжений

Одним из результатов расчетов коммутационных перенапряжений является максимальное значение энергии W , которая выделяется в установленном ОПН 500-750 кВ в самом неблагоприятном для него случае. На основе этого значения W необходимо выбрать такой ОПН 500-750 кВ (испытан воздействием 18 импульсов с энергией $W_{исп}$), который бы проработал в рассматриваемой точке сети не менее 25-30 лет. Например, в течение срока своей эксплуатации большинство высоковольтных выключателей неоднократно подвергается профилактическому обслуживанию (чистке контактов и проч.), а для ОПН такое обслуживание невозможно. Для некоторых ОПН проводится измерение тока проводимости под рабочим напряжением или тепловизионный контроль, но о реальной необходимости подобных измерений дискуссии не утихают до сих пор. По результатам таких измерений ОПН может быть досрочно выведен из эксплуатации, но эти измерения не имеют ничего общего

с профилактическим обслуживанием и не позволяют продлить срок службы ОПН. Учитывая изложенное, следует признать, что для ОПН не существует профилактического обслуживания, а обеспечением надежности ОПН должен заниматься инженер-проектировщик, который закладывает такие токовые и энергетические параметры, которые с учетом расходования ресурса варисторов позволят безаварийно эксплуатировать ОПН в течение всего его нормативного срока службы. В [1] приведена подобная методика выбора ОПН, разработанная С.С. Шуром, но по названным ранее причинам она неприменима. От использования понятия «ресурс ОПН» можно отказаться и выбирать ОПН исходя из простого условия

$$W_{исп} \geq W ,$$

где W – расчетное значение энергии в ОПН, полученное в самом тяжелом расчетном случае; $W_{исп}$ – ближайшее большее к W значение энергии одного прямоугольного импульса тока 2000 мкс по каталогу.

Закладываемые многими проектировщиками запасы в значение $W_{исп}$ относительно расчетного значения W следует признать необоснованными, если под W понимать энергию в самом тяжелом для ОПН расчетном случае.

Опыт эксплуатации свидетельствует о:

- возможных повышении напряжении промышленной частоты в сетях 500-750 кВ, которые, разумеется, приводят к росту коммутационных перенапряжений; о возможных коммутациях длинных ВЛ 500-750 кВ с выведенными из работы ШР 500-750 кВ;
- возможности повторных многократных коммутаций ВЛ 500-750 кВ (например, случаи многократных отключений ВЛ 500-750 кВ из-за лесных пожаров).

Следствием этого на ряде ПС 500-750 кВ были взрывы ОПН 500-750 кВ, в результате которых помимо ОПН повреждалось ближайшее к ним оборудование (трансформаторы тока и проч.). Известны два таких случая:

- ОПН 500 кВ на ВЛ 500 кВ «ПС Новокузнецкая – С.-Ш. ГЭС»;

– ОПН 750 кВ на ВЛ 750 кВ «ПС Владимирская – Калининская АЭС».

Расследование имевших место повреждений ОПН 500-750 кВ показало, что их первопричинами были многократные коммутации со стороны «системы» ВЛ 500-750 кВ длиной более 400 км без шунтирующих реакторов на конце, сопровождавшиеся последующим длительным односторонним включением ВЛ, т.е. повышенными квазистационарными напряжениями на ОПН. Учитывая то, что повреждения ОПН были вызваны заведомо нерасчетными условиями работы, следует отказаться от какого-либо запаса надежности, закладываемого при выборе ОПН в значение $W_{исп}$ по сравнению с расчетной величиной W , как необоснованного.

2.3.4. Пример расчета коммутационных перенапряжений в ОРУ 500 кВ

В первой главе принципы защиты оборудования подстанции от грозовых перенапряжений были проиллюстрированы на примере ОРУ 500 кВ ПС «Луч» (МЭС Центра), которая является типовой в своем классе. Проведем расчеты коммутационных перенапряжений на оборудовании ОРУ 500 кВ ПС «Луч».

Коммутационные перенапряжения, возникающие непосредственно в ОРУ 500 кВ надежно ограничиваются ОПН, установленными у силовых трансформаторов АТ-1,2,3 и могут не рассматриваться, а наибольшую опасность для оборудования ОРУ 500 кВ представляют перенапряжения, связанные с коммутациями двух присоединенных ВЛ 500 кВ («Кострома - Луч» и «Луч - Нижегородская»), которые воздействуют на оборудование линейных ячеек этих ВЛ.

При плановом включении ВЛ со стороны «системы», включении на короткое замыкание, отключении асинхронного хода наибольшие коммутационные перенапряжения в линейных ячейках ПС «Луч» будут возникать при наиболее неблагоприятных параметрах «системы», которые соответствуют ее наибольшей индуктивности. При ОАПВ коммутационные перенапряжения зависят не от параметров примыкающих систем, а, главным

образом, от наличия шунтирующих реакторов, которых на присоединенных к ПС «Луч» ВЛ 500 кВ нет.

Наибольшая индуктивность «системы» 500 кВ соответствует малореальному случаю, когда в ней в работе находится только один силовой автотрансформатор или один блок генератор-трансформатор, или одна ВЛ 500 кВ помимо коммутируемой. Предположим, что на каждой из ПС «Нижегородская» и ПС «Луч», выступающих в роли «системы» при рассмотрении коммутаций соответственно ВЛ «Луч - Нижегородская» и «Кострома – Луч», в работе находится всего два автотрансформатора 500/220 кВ (3хАОДЦТН-167000/500/220 кВ), для которого $u_k^{BH-CH} = 11\%$, $u_k^{BH-CH} = 35\%$, тогда индуктивное сопротивление «системы» (на 50 Гц) соответственно по прямой и нулевой последовательности

$$X_{C1} = \frac{u_k^{BH-CH}}{100} \cdot \frac{(U_{ном}^{BH})^2}{2S_{ном}} = 27.5 \text{ Ом}, \quad X_{C0} = \frac{u_k^{BH-CH}}{100} \cdot \frac{(U_{ном}^{BH})^2}{2S_{ном}} = 87.5 \text{ Ом},$$

а индуктивности (в Гн) по прямой и нулевой последовательности $L_{C1} = X_{C1} / 314$ и $L_{C0} = X_{C0} / 314$.

Наибольшие перенапряжения при отключении асинхронного хода будут тогда, когда в работе находится все оборудование ПС «Луч», т.е. АТ-1,2,3 и еще одна ВЛ 500 кВ помимо коммутируемой. Эквивалентное сопротивление АТ-1,2,3 (мощностью 501 МВА каждый) составит по прямой последовательности $X_{AT1} = 18.3 \text{ Ом}$, а по нулевой $X_{AT0} = 58.3 \text{ Ом}$. Эквивалентное сопротивление ВЛ 500 кВ может быть определено как $X_{ВЛ} = X_1^* \cdot l$, $X_{ВЛ0} = 2X_{ВЛ}$, где l – длина ВЛ, X_1^* – погонное индуктивное сопротивление по прямой последовательности, составляющее 0.3 Ом/км (для ВЛ 500 кВ). Результаты определения эквивалентов «системы» и подстанции «Луч» для случаев различных коммутируемых ВЛ 500 кВ приведены в табл.2.11. Эквивалентную эдс «системы» и эдс ПС «Луч» примем соответствующими наибольшему рабочему напряжению сети 500 кВ.

Табл.2.11. Исходные данные для расчетов коммутационных перенапряжений (Ом).

Название коммутируемой ВЛ	Длина ВЛ, км	«система» X_{C1}/X_{C0}	Составляющие эквивалента подстанции «Луч»		
			X_{AT1} / X_{AT0}	$X_{ВЛ1} / X_{ВЛ0}$	$X_{ПС1} / X_{ПС0}$
Кострома - Луч	207	27.5 / 87.5	18.3 / 58.3	14 / 28	7.9 / 18.9
Луч - Нижегородская	46,5			62.1 / 124.2	14.1 / 39.7

Результаты расчетов максимальных коммутационных перенапряжений на оборудовании линейных ячеек ВЛ 500 кВ, полученные в ЕМТР в трехфазной постановке с учетом разброса работы полюсов выключателя, приведены в табл.2.12. Видно, что максимальные перенапряжения возникают при отключении асинхронного хода и достигают кратности 3.85, что выше, чем получено в [38] в упрощенной однофазной постановке. Опасные коммутационные перенапряжения имеют место при включении ВЛ 500 кВ со стороны «системы» на однофазное короткое замыкание, когда кратность перенапряжений достигает 2.85, т.е. более расчетной для оборудования (табл.2.4). На основе табл.2.12 показано, что в линейные ячейки обоих присоединенных к ПС «Луч» ВЛ 500 кВ необходима установка ОПН 500 кВ.

Таблица 2.12. Результаты расчетов коммутационных перенапряжений без учета ОПН линейных ячеек ВЛ 500 кВ.

Название ВЛ	Длина ВЛ, км	Расчетный случай	Схема	U _л , кВ
Кострома - Луч	207	плановое включение	рис.2.1	1130
		включение на одноф. к.з.	рис.2.2	1260
		включение при ОАПВ	рис.2.3	940
		отключение ас. хода	рис.2.5	1500
Луч - Нижегородская	46,5	плановое включение	рис.2.1	1070
		включение на одноф. к.з.	рис.2.2	1200
		включение при ОАПВ	рис.2.3	900
		отключение ас. хода	рис.2.5	1410

Результаты расчетов выделяющихся в ОПН энергий приведены в табл.2.13 и получены при типовой вольтамперной характеристике ОПН 500 кВ, у которой остающееся напряжение на прямоугольном импульсе тока амплитудой 1000 А составляет 800 кВ.

Таблица 2.13. Результаты расчетов энергий в ОПН линейных ячеек ВЛ 500 кВ.

Название ВЛ	Длина ВЛ, км	Расчетный случай	Схема	W, кДж
Кострома - Луч	207	плановое включение	рис.2.1	460
		включение на одноф. к.з.	рис.2.2	840
		включение при ОАПВ	рис.2.3	340
		отключение ас. хода	рис.2.5	1800
Луч - Нижегородская	46,5	плановое включение	рис.2.1	150
		включение на одноф. к.з.	рис.2.2	270
		включение при ОАПВ	рис.2.3	90
		отключение ас. хода	рис.2.5	530

В табл.2.12 показано, что максимальные коммутационные перенапряжения несущественно зависят от длины коммутируемой ВЛ, т.е. практически не зависят от длины и максимальные импульсные коммутационные токи в ОПН, что уже было отмечено при анализе аналитического выражения (2.1).

В табл.2.13 показано, что максимальные выделяющиеся в ОПН энергии при коммутационных перенапряжениях существенно зависят от длины ВЛ, т.е. от формы импульса коммутационных перенапряжений, его длительности, и, поэтому, выбор ОПН должен осуществляться на основе расчетов не токовых, а энергетических нагрузок на ОПН.

Для ОПН 500 кВ, установленных в линейной ячейке ВЛ «Луч - Нижегородская» и ВЛ «Кострома - Луч», выделяющаяся энергия в самом неблагоприятном случае не превосходит 530 кДж и 1800 кДж, что соответствует удельной энергоемкости ОПН около 2 кДж/кВ и 6 кДж/кВ и

очень хорошо согласуется с данными табл.2.6, полученными в упрощенной постановке в пренебрежении внутренними индуктивными сопротивлениями сети и их различием для прямой и нулевой последовательности.

Если отключение асинхронного хода по ВЛ «Кострома - Луч» проводить выключателем «системы», а не выключателем ПС «Луч», то энергоемкость ОПН в линейной ячейке «Кострома - Луч» может быть снижена с 6 кДж/кВ до приблизительно 3 кДж/кВ, т.е. весьма существенно.

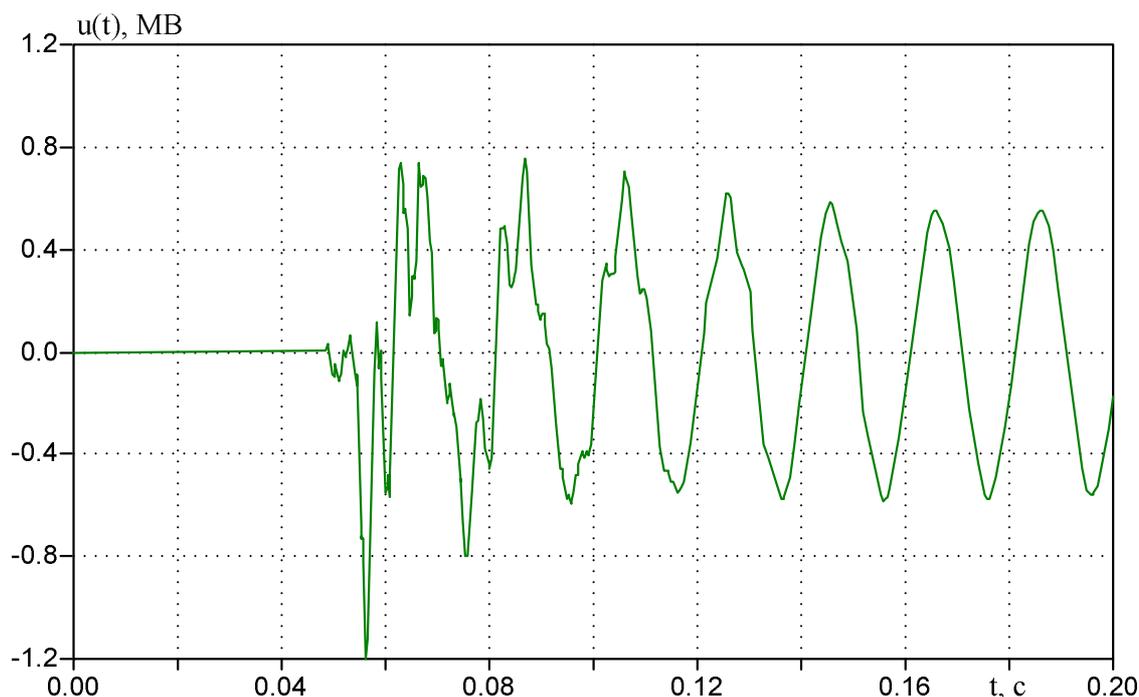


Рис.2.9. Неограниченное ОПН напряжение фазы «В» в конце ВЛ 500 кВ «Кострома-Луч» при включении этой ВЛ со стороны ПС «Кострома» на однофазное короткое замыкание у шин ПС «Луч».

В качестве примера на рис.2.9 показана расчетная осциллограмма неограниченного действием ОПН напряжения фазы «В» при включении ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» со стороны «системы» (со стороны ПС «Кострома») на однофазное короткое замыкание у шин ПС «Луч». На рис.2.9 видно, что максимальное значение коммутационных перенапряжений превосходит 1200 кВ (1260 кВ по табл.2.12), а после затухания переходной составляющей процесса напряжение в конце ВЛ определяется вынужденной составляющей (амплитуда 560 кВ), которая с учетом заложенных в расчет параметров прямой и нулевой последовательности ПС «Кострома» и ВЛ «Кострома - Луч»

приблизительно на 30% выше фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети (амплитуда 428 кВ).

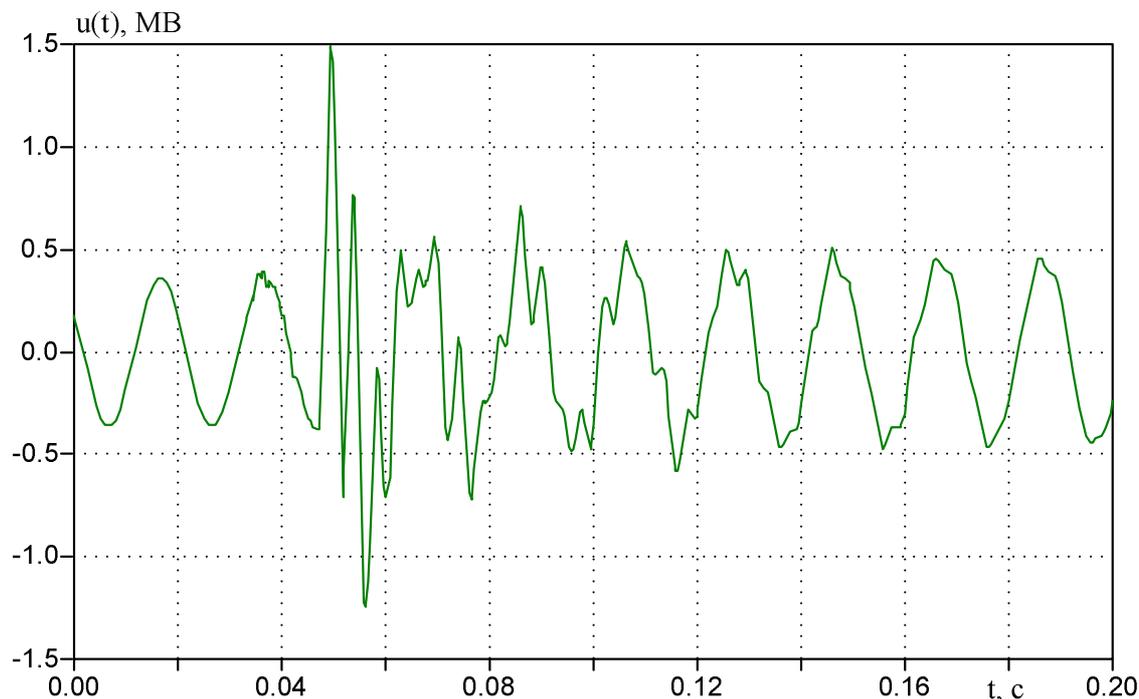


Рис.2.10. Неограниченное ОПН напряжение фазы «В» в конце ВЛ 500 кВ «Кострома-Луч» при отключении асинхронного хода по этой ВЛ выключателем ПС «Луч» в момент, соответствующий углу 180 градусов между эквивалентными эдс ПС «Кострома» и «Луч».

На рис.2.10 показана расчетная осциллограмма неограниченного действием ОПН напряжения фазы «В» при отключении асинхронного хода по ВЛ «Кострома - Луч» выключателем ПС «Луч» в наиболее неблагоприятный с точки зрения возникающих коммутационных перенапряжений момент, соответствующий углу 180 градусов между эквивалентными эдс ПС «Кострома» и «Луч». На рис.2.10 максимальное значение коммутационных перенапряжений составляет около 1500 кВ (см. табл.2.12).

На рис.2.11 показана расчетная осциллограмма импульсного тока в ОПН фазы «В», установленного в конце ВЛ «Кострома - Луч» у ПС «Луч», при отключении асинхронного хода по ВЛ «Кострома - Луч» выключателем ПС «Луч» в момент, соответствующий углу 180 градусов между эквивалентными эдс ПС «Кострома» и «Луч».

Проведенные на примере ПС «Луч» расчеты в подробной компьютерной модели подтверждают данные табл.2.6, полученные в упрощенной модели, и

поэтому указанные в табл.2.6 удельные энергии ОПН могут стать неплохой основой для выбора основных технических характеристик ОПН 110-750 кВ, предназначенных для установки в линейные ячейки ВЛ 110-750 кВ. При этом рекомендуется принимать во внимание данные табл.2.10 (понятие класса разряда линии по МЭК), которые помимо ограничения коммутационных перенапряжений учитывают необходимость обеспечения надежной работы ОПН в режиме рассеивания энергии грозových перенапряжений.

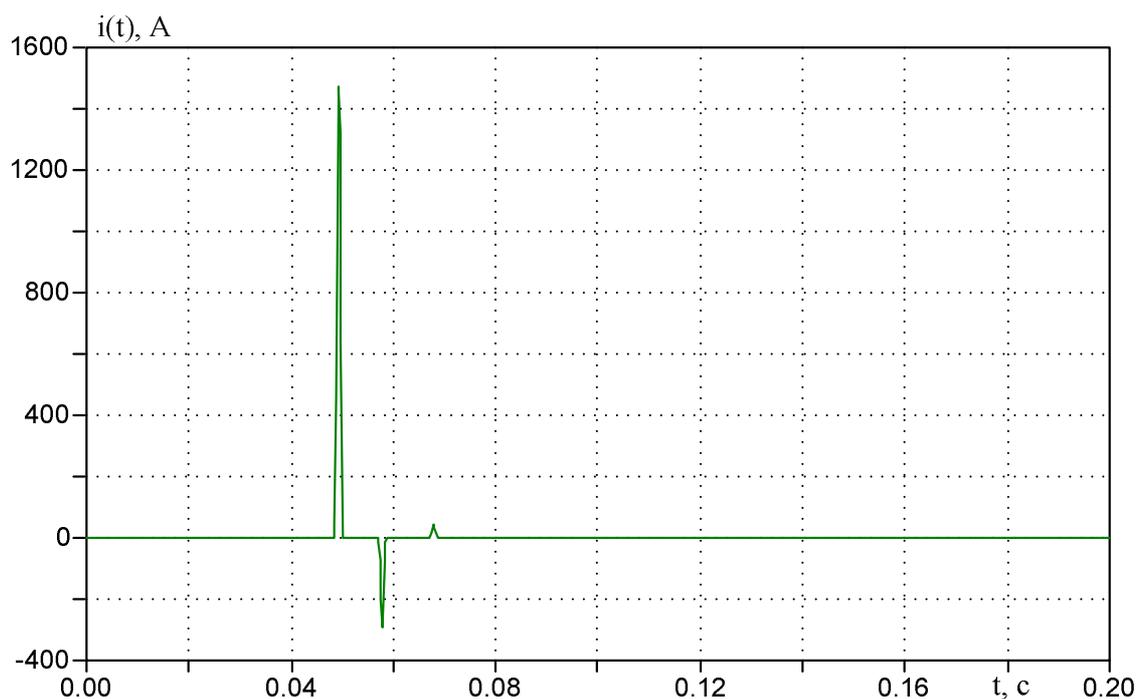


Рис.2.11. Импульсный ток в ОПН фазы «В», установленного в конце ВЛ 500 кВ «Кострома-Луч» у ПС «Луч», при отключении асинхронного хода по этой ВЛ выключателем ПС «Луч» в момент, соответствующий углу 180 градусов между эквивалентными эдс ПС «Кострома» и «Луч».

Определяющими характеристики ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений являются, как правило, воздействия на ОПН при коммутациях присоединенных к ПС линий. Достаточные токовые и энергетические характеристики ОПН, установленных у силовых трансформаторов и автотрансформаторов, будут не выше, чем для ОПН линейных ячеек, так как:

- перенапряжения на питающем конце ВЛ всегда ниже, чем на приемном;

– в ОРУ, как правило, установлено несколько комплектов ОПН (по числу силовых трансформаторов и автотрансформаторов).

Расчеты при реальных длинах присоединенных к ПС линий свидетельствуют об отсутствии необходимости установки у силовых трансформаторов и автотрансформаторов ОПН 110-750 кВ, удельная энергоемкость которых более уровня 2-5 кДж/кВ (меньшие значения соответствуют большему числу ОПН, установленных на подстанции), определяемого, главным образом, необходимостью рассеивания энергии грозových перенапряжений.