

4. ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В БЛОЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН

Современные ОПН не предназначены для ограничения квазистационарных перенапряжений, от которых могут повреждаться, что в свою очередь вызывает повышенное внимание к этому виду перенапряжений [1,24,27]. Для правильного выбора основных технических характеристик ОПН, обеспечивающих его надежную работу при квазистационарных перенапряжениях, необходимо проведение соответствующих расчетов [1,24].

Одной их схем, в которых возможно возникновение опасных для ОПН квазистационарных перенапряжений, является так называемая блочная схема [1,24,38,47], в которой воздушная линия коммутируется в блоке с силовым трансформатором или автотрансформатором. В проектной практике следует избегать блочных схем как опасных для ОПН, однако ряд таких электропередач уже эксплуатируется и требует проведения расчетов в рамках замены устаревших вентильных разрядников на ОПН.

В [48] отмечается, что проведение расчетов квазистационарных (особенно феррорезонансных) перенапряжений в блочных передачах требует соответствующих методик и программного обеспечения, которые в настоящее время малодоступны и достаточно сложны для рядового инженера. Учитывая это, научный интерес представляет разработка простых доступных расчетных моделей и наглядное объяснение с их помощью механизмов возникновения квазистационарных перенапряжений в блочных передачах и способов борьбы с ними.

Опасность внутренних перенапряжений в блочной передаче 750/500 кВ рассмотрена в [38] и подтверждена расчетными осциллограммами. Ниже, в отличие от [38], основное внимание уделено теоретическому обоснованию механизма возникновения в блочной передаче опасных для оборудования внутренних перенапряжений.

Соискателем на примерах блочной передачи 750/500 кВ и блочной передачи 110 кВ при помощи простых аналитических выкладок показан механизм возникновения опасных для ОПН квазистационарных перенапряжений, приведены результаты компьютерных расчетов с использованием программного комплекса ЕМТР. Кроме того, указаны способы снижения квазистационарных перенапряжений и наглядно пояснена их эффективность, а также определены основные технические характеристики ОПН для установки в блочные передачи.

4.1. Расчеты внутренних перенапряжений в блочной передаче 750/500 кВ

Схема блочной передачи 750/500 кВ, в которой воздушная линия 500 кВ может коммутироваться в блоке с автотрансформатором 750кВ/500кВ выключателями 750 кВ, приведена на рис.4.1. Подобная схема применена на ПС 750 кВ «Металлургическая» (МЭС Центра), для которой длина ВЛ 500 кВ «Металлургическая - Старый Оскол» составляет 36 км, а мощность автотрансформатора 750/500/11 кВ составляет 3х417 МВА. Относительно малая длина ВЛ 500 кВ послужила причиной отказа от установки на ПС «Металлургическая» выключателя 500 кВ у АТ.

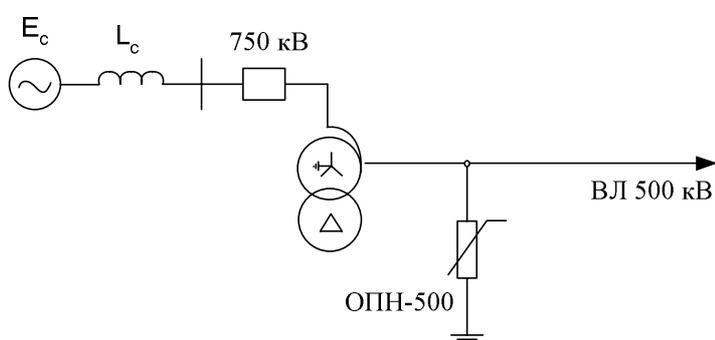


Рис.4.1. Схема блочной передачи 750/500 кВ.

Расчеты перенапряжений в схеме рис.4.1 проведены аналитически и подкреплены компьютерными осциллограммами, полученными в программном комплексе ЕМТР. При составлении схемы замещения автотрансформатора учитывалась его третичная обмотка и способ ее соединения. Учитывающий намагничивание нелинейный шунт, который наиболее правильно включать на выводе обмотки низкого напряжения (НН), был принят во внимание лишь на финальной стадии рассмотрения вопроса. В рассматриваемом автотрансформаторе собственная индуктивность обмотки среднего напряжения (СН) очень мала (близка к нулю) и, поэтому, она не приведена на расчетной ЕМТР схеме замещения фазы автотрансформатора (рис.4.2).

В схеме рис.4.1 возникновение квазистационарных перенапряжений большой кратности наиболее вероятно в несимметричных режимах питания блока АТ-ВЛ, в которых его неполнофазное питание осуществляется лишь со

стороны 750 кВ автотрансформатора. Условимся односторонне питаемый со стороны 750 кВ автотрансформатора блок АТ-ВЛ называть «холостым».

Принципиально можно рассмотреть большое число возможных несимметричных режимов питания холостого блока АТ-ВЛ, однако ограничимся лишь одним – отключением холостой ВЛ 500 кВ вместе с автотрансформатором выключателем 750 кВ, так как согласно [38] этот случай является наиболее тяжелым, а по данным [49] именно в подобных случаях происходили повреждения ОПН 500 кВ.

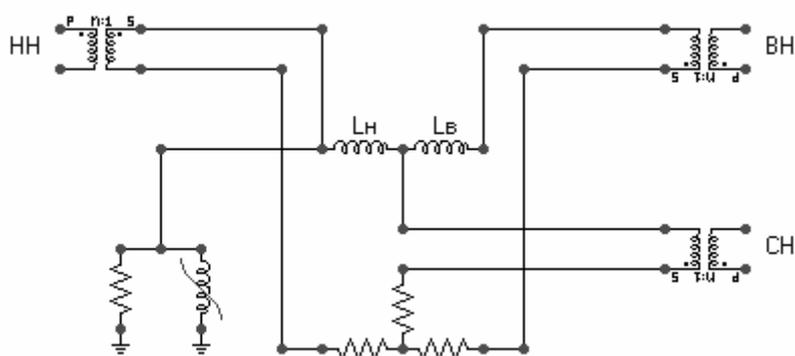


Рис.4.2. EMTP-схема замещения фазы трехобмоточного автотрансформатора.

4.1.1. Установившийся режим работы холостого блока АТ-ВЛ при его включении одной фазой на сеть 750 кВ

Рассмотрим установившийся режим работы холостого блока АТ-ВЛ при включении одной фазой на сеть 750 кВ. Такой режим может быть следствием отказа фазы выключателя 750 кВ при отключении холостого блока АТ-ВЛ. На данном этапе не учтены шунты намагничивания, а система 750 кВ положена бесконечно мощной.

Пусть фазы «В» и «С» выключателя 750 кВ отключились, а фаза «А» отказала и осталась замкнутой. С использованием метода симметричных составляющих получено напряжение на отключенных фазах «В» и «С» автотрансформатора:

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C = \frac{\dot{U}_A (\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1)}{2\dot{Z}_1 + \dot{Z}_0}, \quad (4.1)$$

где \dot{Z}_1 и \dot{Z}_0 – комплексные входные сопротивления блока АТ-ВЛ, определенные со стороны 750 кВ по прямой и нулевой последовательностям.

Напряжение на отключенных фазах «В» и «С» существенно зависит от схемы соединения третичной обмотки автотрансформатора (замкнута, разомкнута), так как эта схема определяет входное сопротивление блока АТ-ВЛ по нулевой последовательности \dot{Z}_0 . Учитывая то, что в эксплуатации размыкание третичной обмотки автотрансформатора крайне нежелательно, далее такой случай рассмотрен, главным образом, как теоретическая возможность.

Третичная обмотка замкнута в треугольник.

На промышленной частоте

$$\dot{Z}_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$$

и, так как третичная обмотка замкнута в треугольник,

$$\dot{Z}_0 = j\omega L_{BH-HH},$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (рад/с), C_1 – емкость ВЛ 500 кВ прямой последовательности (приведенная к стороне 750 кВ), L_{BH-HH} – индуктивность короткого замыкания пары обмоток ВН и НН (вычисленная на основе паспортных данных трансформатора u_k^{BH-HH} и приведенная к стороне 750 кВ).

В выражении (4.1) на промышленной частоте имеем

$$\frac{\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1}{2\dot{Z}_1 + \dot{Z}_0} = -\frac{1 + \omega^2 L_{BH-HH} C_1}{2 - \omega^2 L_{BH-HH} C_1} \approx -0.5.$$

Показано, что в случае замкнутого треугольника на стороне НН автотрансформатора

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C = -0.5\dot{U}_A, \quad (4.2)$$

т.е. при принятых допущениях напряжение на отключенных фазах 750 кВ автотрансформатора составляет половину напряжения включенной фазы, при

этом напряжения включенной и отключенных фаз находятся в противофазе (имеют фазовый сдвиг 180 градусов). Этот вывод справедлив и для напряжений на стороне 500 кВ (рис.4.3).

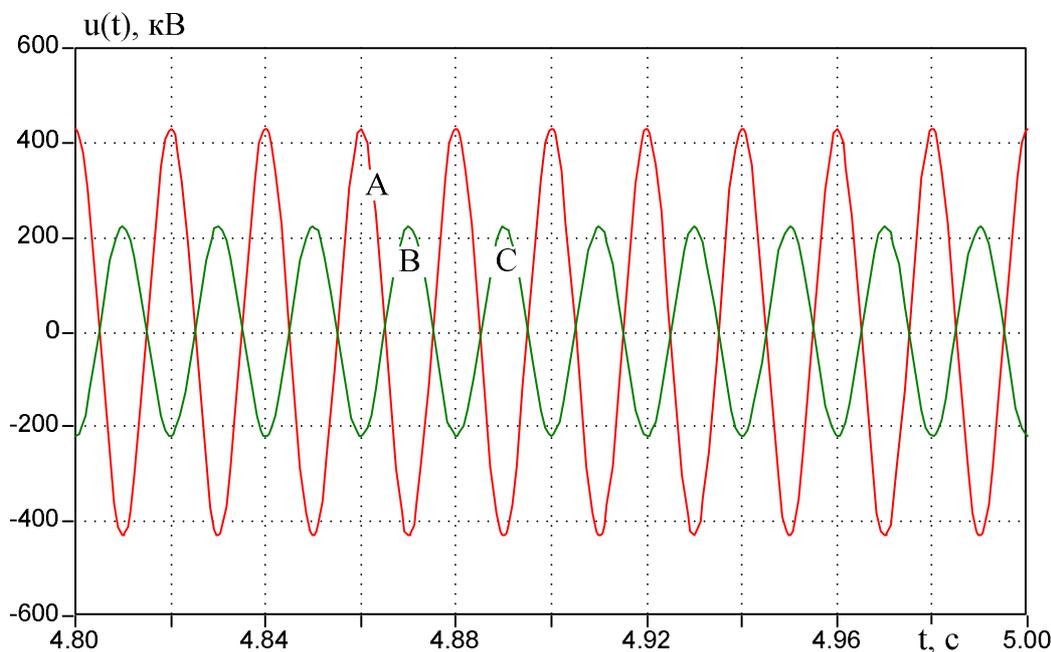


Рис.4.3. Напряжение фаз ВЛ 500 кВ при питании холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ только по фазе «А» (треугольник АТ замкнут).

Третичная обмотка разомкнута.

На промышленной частоте

$$\dot{Z}_1 = \frac{1}{j\omega C_1},$$

$$\dot{Z}_0 = \frac{1}{j\omega C_0},$$

где C_1 и C_0 – емкость ВЛ 500 кВ по прямой и нулевой последовательности (приведенная к стороне 750 кВ).

В выражении (4.1) на промышленной частоте имеем

$$\frac{\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1}{2\dot{Z}_1 + \dot{Z}_0} = \frac{C_1 - C_0}{2C_0 + C_1} = \frac{C_M}{C_0 + C_M},$$

где C_M – междуфазная емкость ВЛ, определенная из условия $C_1 = C_0 + 3C_M$.

С учетом погонных параметров типовой ВЛ 500 кВ $C_1^* = 12 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $C_0^* = 8.8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, получено

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C = 0.11\dot{U}_A, \quad (4.3)$$

т.е. при принятых допущениях напряжение на отключенных фазах 750 кВ автотрансформатора составляет приблизительно одну десятую напряжения включенной фазе, при этом напряжения включенной и отключенных фаз находятся в фазе (без фазового сдвига). Этот вывод справедлив и для напряжений на стороне 500 кВ (рис.4.4).

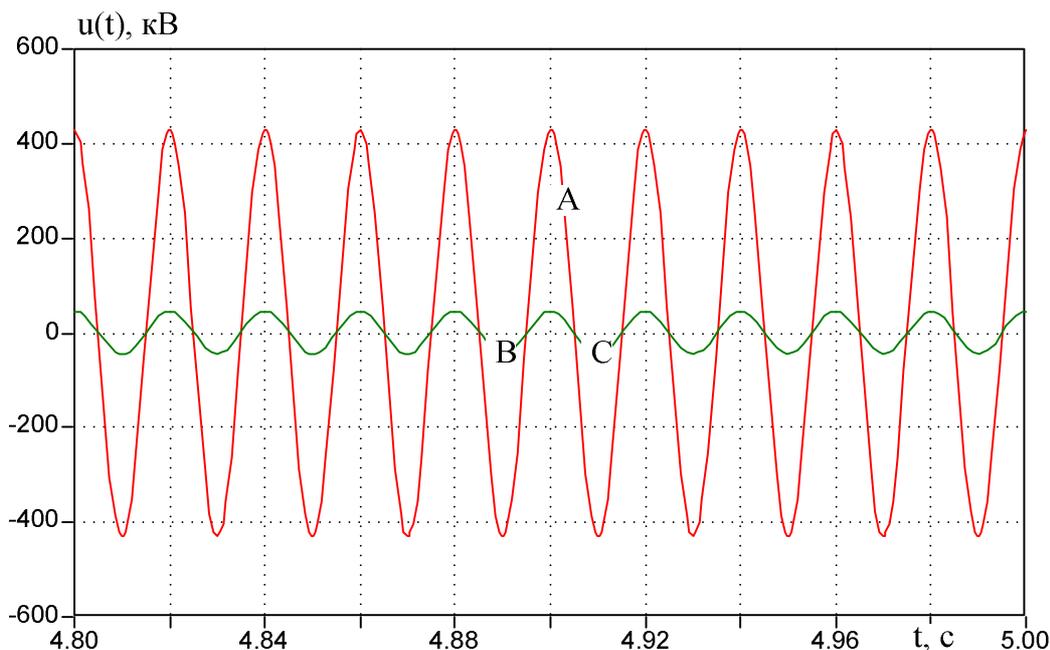


Рис.4.4. Напряжение фаз ВЛ 500 кВ при питании холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ только по фазе «А» (треугольник АТ разомкнут).

4.1.2. Переходный процесс отключения холостого блока АТ-ВЛ с учетом разброса в работе фаз выключателя 750 кВ

Рассмотрим процесс отключения от сети 750 кВ холостого блока АТ-ВЛ при отказе одной из фаз выключателя 750 кВ. На данном этапе не учтены шунты намагничивания, а система 750 кВ положена бесконечно мощной.

Принято, что в установившемся режиме работы холостого блока АТ-ВЛ, предшествовавшем отключению этого блока, напряжение фаз ВЛ 500 кВ относительно земли соответствовало наибольшему рабочему напряжению сети 500 кВ, т.е. амплитуда напряжения фаз ВЛ 500 кВ составляла $E_M = \sqrt{2} \cdot 525 / \sqrt{3} = 428$ кВ.

Третичная обмотка замкнута в треугольник.

Предположим, что при отключении холостого блока АТ-ВЛ первым происходит гашение дуги в нуле тока выключателя фазы «С». Учитывая, что третичная обмотка АТ соединена в треугольник, напряжение на линии в фазе «С» не изменится по сравнению со случаем симметричного включения всеми тремя фазами.

При гашении дуги в нуле тока выключателя фазы «В» напряжение на ВЛ 500 кВ в отключаемой фазе «В» будет близко к E_M , так как потребляемый блоком АТ-ВЛ из сети 750 кВ ток носит емкостной характер. Таким образом, в момент времени, непосредственно предшествующий гашению дуги в фазе «В» и отключению этой фазы, напряжение на емкости ВЛ 500 кВ этой фазы можно оценить как E_M , что для симметричной тройки напряжений соответствует напряжению оставшейся в работе фазы «А» $U_A = -0.5E_M$.

После отключения двух фаз «В» и «С» выключателя 750 кВ напряжение на ВЛ 500 кВ после затухания переходного процесса определяется уже напряжением фазы «А» согласно (4.2), с использованием которого напряжение в фазе «В» сразу после отключения будет $0.25E_M$ («начальное» напряжение на емкости фазы «В»).

С использованием инженерной формулы для оценки максимальных коммутационных перенапряжений

$$U_{\max} = 2U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}}$$

для фазы «В» при вынужденной («конечной» после затухания переходного процесса) составляющей напряжения $U_{\text{кон}} = -0.5E_M$ (из выражения (4.2)) и начальном напряжении на емкости $U_{\text{нач}} = 0.25E_M$ определено $|U_{\max}| = 1.5E_M$.

Осциллограммы процессов в фазах ВЛ 500 кВ показаны на рис.4.5, на котором напряжение в фазах после отключения выключателя представляет собой вынужденную составляющую (в противофазе с напряжением фазы «А»), наложенную на затухающую апериодическую, а кратность внутренних перенапряжений достигает 1.5 о.е. (по отношению к E_M).

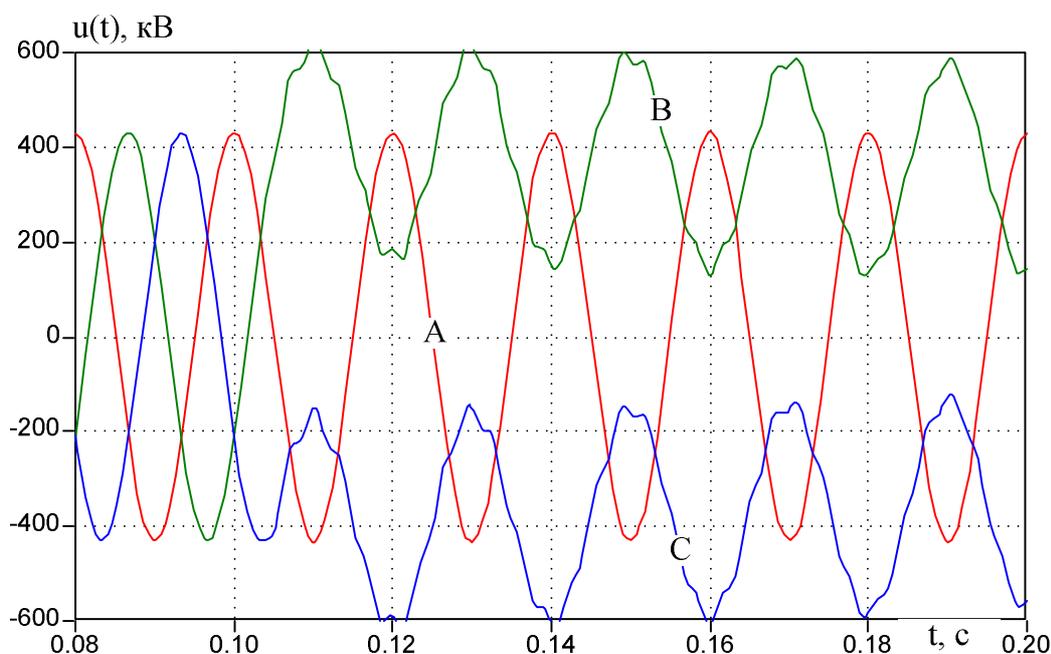


Рис.4.5. Напряжение фаз ВЛ 500 кВ при отключении в момент 0.1 с холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ двумя фазами «С» и «В» выключателя 750 кВ (треугольник АТ замкнут).

На рис.4.5 показано, что переходный процесс затухает относительно медленно, и снижение перенапряжений на ВЛ 500 кВ в фазах «В» и «С» с максимального уровня $1.5E_M$ до безопасного для оборудования $1.0E_M$ происходит по осциллограммам приблизительно за 0.5 сек (осциллограммы с большой временной разверткой здесь не приведены). В течение первых 5 периодов промышленной частоты после возникновения внутренних перенапряжений можно считать, что в фазах «В» и «С» на ВЛ 500 кВ держатся перенапряжения уровня $1.5E_M$. Перенапряжения такого уровня будут воздействовать на защитные ОПН 500 кВ фаз «В» и «С», установленные на стороне 500 кВ автотрансформатора для его защиты, прежде всего, от грозových перенапряжений. Оценить допустимость воздействия напряжения вида рис.4.5 на ОПН сложно, так как напряжение носит аperiодический характер с наложенными колебаниями промышленной частоты, что затрудняет использование характеристики «напряжение-время», справедливой при синусоидальном воздействующем на ОПН напряжении. Однако можно утверждать, что воздействие напряжения с аperiодической составляющей, не имеющего «нулей» напряжения, является более тяжелым для ОПН по

сравнению с воздействием переменного напряжения того же максимального значения.

Третичная обмотка разомкнута.

Как и ранее предположим, что при отключении холостого блока АТ-ВЛ первым происходит гашение дуги в нуле тока выключателя фазы «С». Учитывая то, что третичная обмотка АТ разомкнута, напряжение на линии в фазе «С» изменится по сравнению со случаем симметричного включения всеми тремя фазами, т.е. отключение фазы «С» уже вызовет переходный процесс.

Расчеты (рис.4.6) внутренних перенапряжений с учетом сравнительно низкой вынужденной составляющей напряжения (4.3) показывают, что в случае разомкнутого треугольника максимальное напряжение на емкостях фаз «В» и «С» ВЛ 500 кВ не превосходит $(1.10 \div 1.15)E_M$, т.е. существенно меньше, чем в случае замкнутого треугольника.

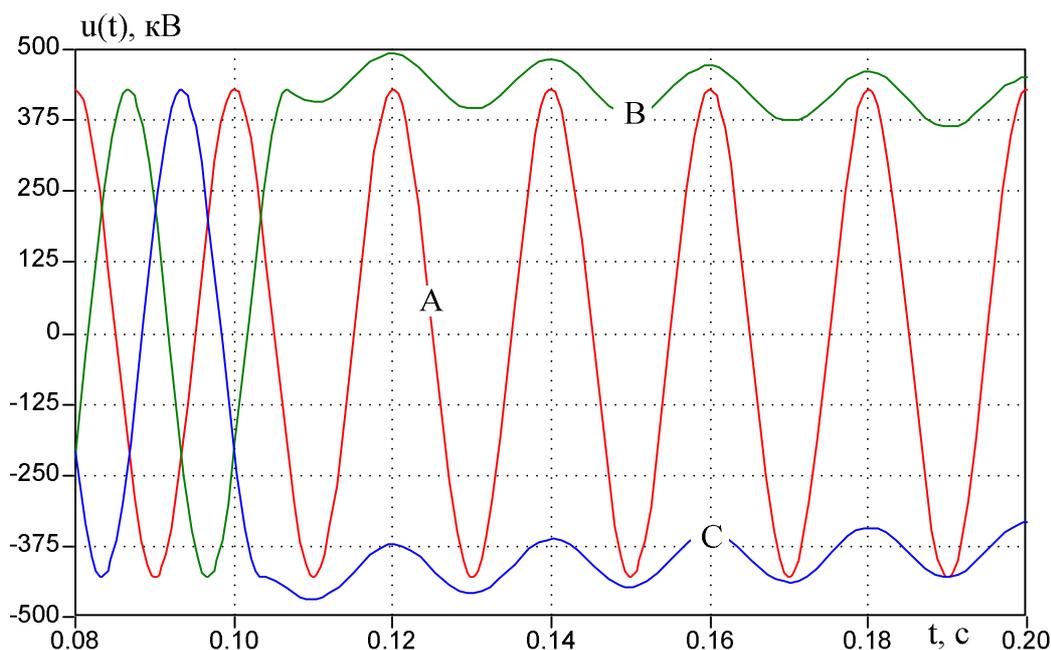


Рис.4.6. Напряжение фаз ВЛ 500 кВ при отключении в момент 0.1 с холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ двумя фазами «С» и «В» выключателя 750 кВ (треугольник АТ разомкнут).

4.1.3. Переходный процесс отключения холостого блока АТ-ВЛ с учетом намагничивания и реальных параметров «системы»

Ранее вывод формул и построение осциллограмм проведено для случая бесконечно мощной системы 750 кВ и без учета нелинейных свойств

магнитопровода автотрансформатора. Ниже расчеты проведены в полной схеме рис.4.1 с учетом намагничивания и реальных параметров сети 750 кВ.

Третичная обмотка замкнута в треугольник.

Согласно рис.4.5 при отключении холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ только двумя фазами «В» и «С» выключателя 750 кВ напряжение в этих фазах ВЛ 500 кВ существенно повышается. Подобное повышение напряжения приводит к насыщению стали магнитопровода автотрансформатора и может вызвать феррорезонанс, что отражено на рис.4.7, на котором показана расчетная осциллограмма напряжения в фазе «В» на ВЛ 500 кВ (рассмотрен случай без ОПН 500 кВ). В фазе «С» процессы аналогичны процессам в «В» и поэтому не показаны. Аналогичные рис.4.7 осциллограммы, характеризующиеся такими же высокими кратностями внутренних перенапряжений, приведены и в [38].

Следует отметить, что влияние на снижение максимальных перенапряжений на ВЛ 500 кВ оказывает коронирование проводов ВЛ 500 кВ, однако здесь это не учтено.

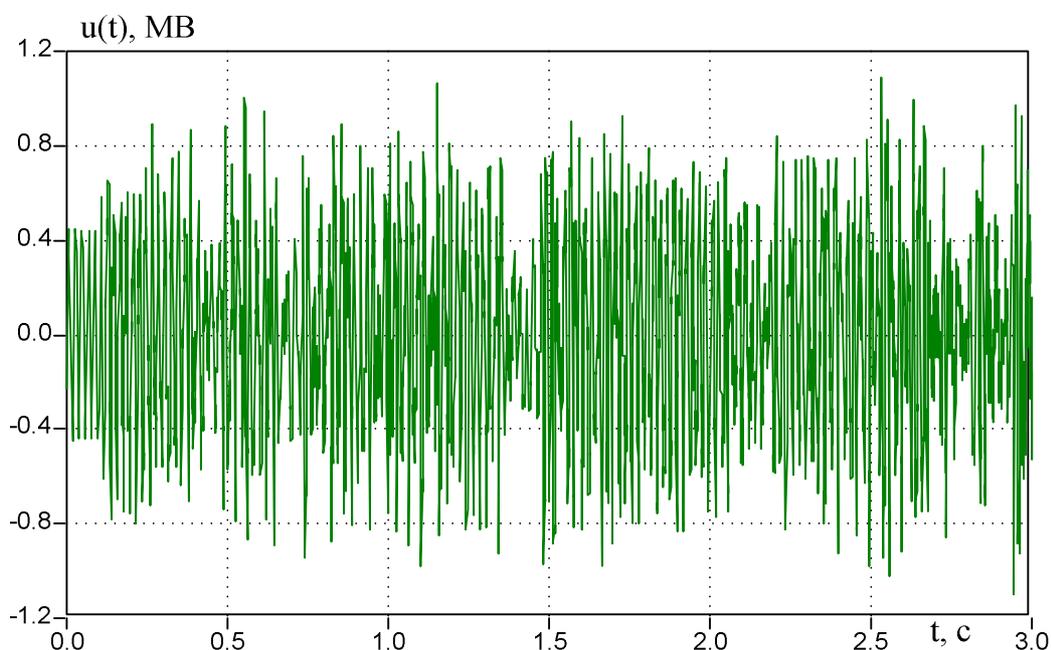


Рис.4.7. Напряжение фазы «В» ВЛ 500 кВ при отключении в момент 0.1 с холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ двумя фазами «С» и «В» выключателя 750 кВ (треугольник АТ замкнут).

Третичная обмотка разомкнута.

Согласно рис.4.6 при разомкнутом треугольнике отключение холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ двумя фазами «В» и «С» выключателя 750 кВ не вызывает перенапряжений высокой кратности в фазах ВЛ 500 кВ.

Подобное повышение напряжения не приводит к феррорезонансу, что отражено на рис.4.8, на котором показана расчетная осциллограмма напряжения в фазе «В» на ВЛ 500 кВ (рассмотрен случай без ОПН 500 кВ). В фазе «С» процессы аналогичны процессам в «В» и поэтому не показаны.

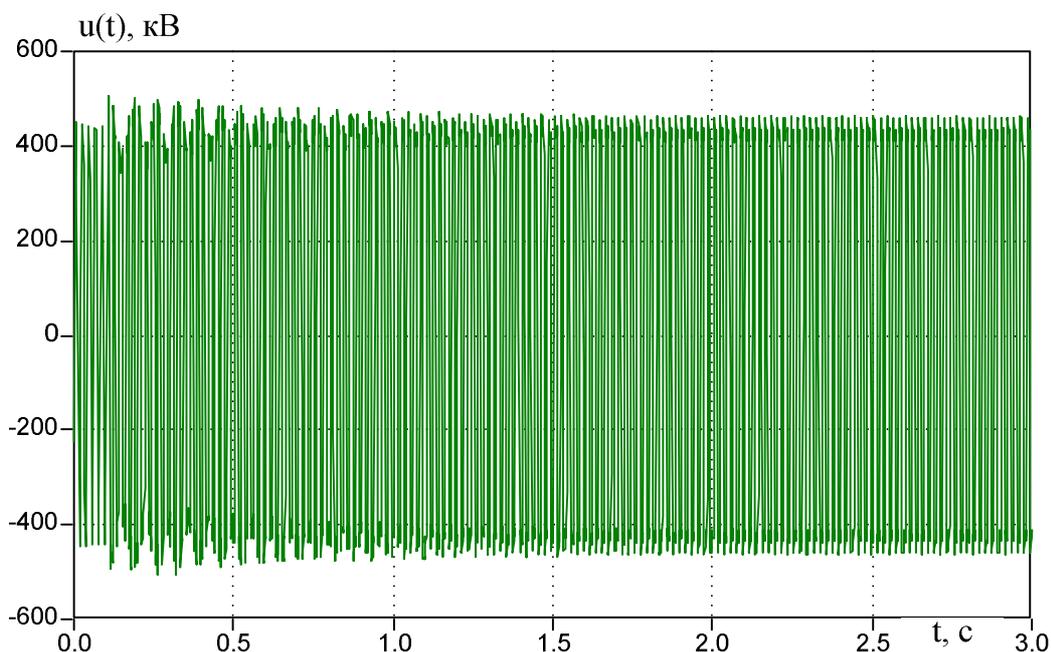


Рис.4.8. Напряжение фазы «В» ВЛ 500 кВ при отключении в момент 0.1 с холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ двумя фазами «С» и «В» выключателя 750 кВ (треугольник АТ разомкнут).

4.1.4. Токовые и энергетические нагрузки на ОПН

в блочной передаче 750/500 кВ и выбор характеристик ОПН

На рис.4.5-4.8 приведены расчетные осциллограммы неограниченных перенапряжений на ВЛ 500 кВ, которые в эксплуатации будут ограничены действием ОПН 500 кВ. В наиболее благоприятных условиях окажется ОПН с повышенным наибольшим рабочим напряжением, поэтому примем наибольшее рабочее напряжение ОПН 500 кВ равным 333 кВ, что для типового аппарата соответствует остающемуся напряжению 830 кВ при импульсе тока 30/60 мкс амплитудой 1 кА.

Третичная обмотка замкнута в треугольник.

На рис.4.9 приведена расчетная осциллограмма токов в ОПН 500 кВ, а на рис.4.10 – изменение во времени выделяющейся в ОПН 500 кВ энергии.



Рис.4.9. Ток ОПН 500 кВ фазы «В» при отключении в момент 0.1 с холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ двумя фазами «С» и «В» выключателя 750 кВ (треугольник АТ замкнут).

На рис.4.9-4.10 показано, что импульсные токи в ОПН 500 кВ достигают десятков ампер, а выделяющаяся энергия за 2 с неполнофазного режима (включена только одна фаза выключателя 750 кВ) достигает $3.0 \div 3.5$ МДж, что соответствует удельной энергоемкости 10 кДж/кВ, приведенной к наибольшему рабочему напряжению ОПН, принятому равным 333 кВ.

Третичная обмотка разомкнута.

Опасных токовых и энергетических нагрузок на ОПН 500 кВ не возникает.

Проведенные расчеты, а также данные [38,49,50], позволили выработать следующие рекомендации относительно параметров ОПН 500 кВ в блочной передаче рис.4.1:

- наибольшее рабочее напряжение ОПН должно быть не менее 333 кВ (характеристика «напряжение-время» соответствующая);
- энергоемкость одного импульса около 9-10 кДж/кВ.

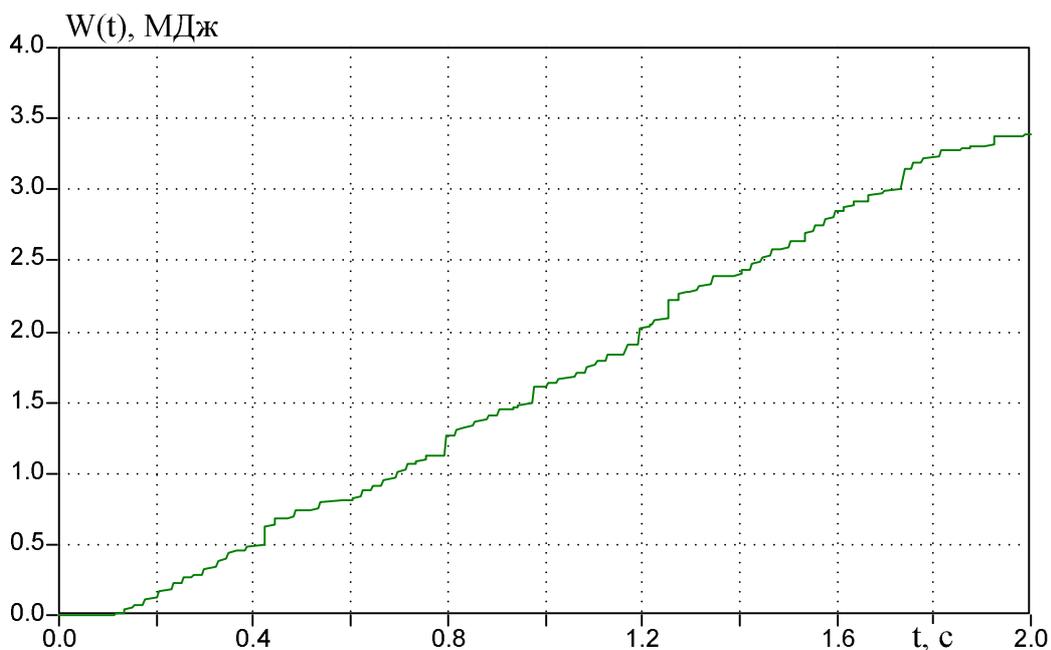


Рис.4.10. Изменение энергии, выделяющейся в ОПН 500 кВ фазы «В» при отключении в момент 0.1 с холостого блока АТ-ВЛ от сети 750 кВ двумя фазами «С» и «В» выключателя 750 кВ (треугольник АТ замкнут).

Рекомендуемые в [24] параметры ОПН 500 кВ в блочных схемах вида рис.4.1 следует признать недостаточными, а отсутствие в [24] учета намагничивания автотрансформатора – некорректным допущением.

На токовые и энергетические нагрузки на ОПН 500 кВ в блочной передаче рис.4.1 в расчетной схеме оказывают существенное влияние характеристики намагничивания автотрансформатора, вольтамперная характеристика ОПН в области малых импульсных токов, коронирование проводов. Точно учесть перечисленные влияющие факторы достаточно сложно.

Было показано, что нагрузки на ОПН определяются длительностью возможных неполнофазных режимов и схемой соединения третичной обмотки автотрансформатора. Опыт эксплуатации схем, аналогичных рис.4.1, а также данные [38,49], свидетельствуют о возможности существования неполнофазных и несимметричных режимов в течение времен, больших 2 сек. При этом возможны многократные коммутации выключателей 500 кВ (на «дальнем» конце ВЛ 500 кВ) и 750 кВ, вызывающие дополнительное нагружение установленных ОПН 500 кВ.

Возможные характеристики ОПН (энергоемкость) ограничены технологическим пределом, обусловленным сложностью качественного изготовления варисторов большого диаметра. Рекомендуемая по результатам расчетов энергоемкость ОПН, составляющая 9-10 кДж/кВ, соответствует максимальной энергоемкости производимых в настоящее время варисторов. Если учесть при этом, что получаемые в расчетах токовые и энергетические нагрузки на ОПН существенно зависят от расчетной модели и могут быть занижены, то можно сделать вывод о нежелательности применения ОПН в блочных передачах (рис.4.1). Для обеспечения возможности безаварийной эксплуатации ОПН возможны два основных пути:

- оснащение схемы рис.4.1 защитами от неполнофазных режимов, которые исключают особенно опасные для ОПН длительные неполнофазные режимы;
- установка выключателей на стороне СН автотрансформатора, что соответствует мировой практике построения сетей высокого напряжения.

4.2. Расчеты внутренних перенапряжений в блочной передаче 110 кВ

Схема блочной передачи 110 кВ, в которой воздушная линия 110 кВ может коммутироваться в блоке с силовым трансформатором 110/10 кВ («звезда-треугольник-11») выключателями 110 кВ, приведена на рис.4.11. Подобная схема достаточно распространена при питании тупиковых и отпаечных подстанций 110 кВ.

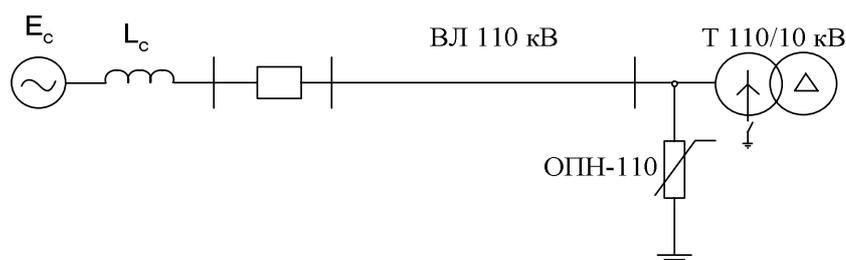


Рис.4.11. Схема блочной передачи 110 кВ.

В эксплуатации перед плановыми коммутациями блока ВЛ-Т рекомендуется предварительно заземлять нейтраль трансформатора, присоединенного к ВЛ. Однако большое число аварийных ситуаций возникает при коммутациях ВЛ 110 кВ без соответствующей подготовки схемы, т.е. когда нейтраль трансформатора на момент коммутации оказывается разземленной.

Условимся питаемый со стороны 110 кВ блок ВЛ-Т, в котором трансформатор 110/10 кВ ненагружен, называть «холостым». Рассмотрим режим работы холостого блока ВЛ-Т при его неполнофазном питании от сети по одной или двум фазам.

Согласно [51] в сложных трехфазных контурах с нелинейными элементами аналитический анализ переходных процессов, как правило, невозможен, а в электрических сетях, где нелинейные индуктивности образованы обмотками силовых трехфазных трансформаторов, невозможно получить какие-либо однофазные эквивалентные схемы по причине наличия у трансформаторов нелинейной электромагнитной связи между фазами. Поэтому рассмотрим механизм влияния заземления нейтрали на возникновение феррорезонансных перенапряжений при помощи весьма упрощенных схем,

которые подкрепим расчетными осциллограммами, полученными в полной ЕМТР трехфазной модели блока ВЛ-Т.

В случае неполнофазного включения блока ВЛ-Т на сеть 110 кВ упрощенная расчетная схема для определения напряжения на отключенных фазах приведена на рис.4.12,а,б. На этих схемах $E_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентная эдс, обусловленная действием подключенных к сети 110 кВ фаз блока ВЛ-Т; $C_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентная емкость между отключенными и подключенными к сети 110 кВ фазами ВЛ; L_T – эквивалентная индуктивность трансформатора, определяемая его индуктивностью рассеяния; L_M – нелинейный шунт намагничивания, определяемый на основе нелинейных свойств стали трансформатора.

Феррорезонансные перенапряжения в схемах вида рис.4.12 возникают в том случае, когда под воздействием напряжения $E_{\text{ЭКВ}}$ окажется цепочка, в которой последовательно соединены емкость и нелинейная индуктивность. Подобная цепочка образуется из $C_{\text{ЭКВ}}$ и L_M в схеме рис.4.12,а, в которой высока вероятность возникновения опасных феррорезонансных перенапряжений на отключенных фазах. В схеме рис.4.12,б параллельно емкости $C_{\text{ЭКВ}}$ включена индуктивность L_T , и их суммарное сопротивление носит индуктивный характер в широком диапазоне частот, что исключает в схеме рис.4.12,б феррорезонансные перенапряжения.

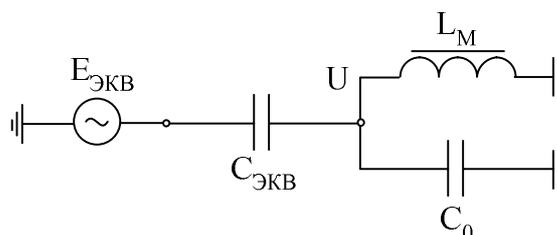


Рис.4.12,а. Эквивалентная схема для расчета напряжения на отключенных фазах (нейтраль силового трансформатора разземлена).

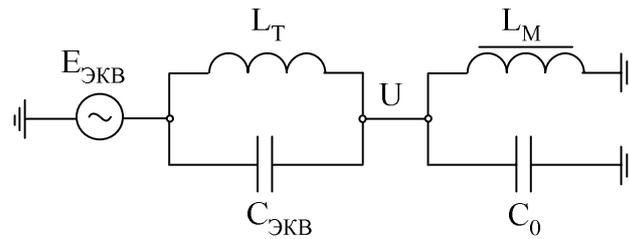


Рис.4.12,б. Эквивалентная схема для расчета напряжения на отключенных фазах (нейтраль силового трансформатора заземлена).

Показано, что при неполнофазных режимах включения блочных схем ВЛ-Т существует вероятность возникновения феррорезонансных перенапряжений на невключенных фазах, но только в том случае, когда нейтраль силового трансформатора разземлена. В подтверждение этого на рис.4.13-4.16 приведены расчетные осциллограммы, полученные в полной трехфазной схеме для ВЛ 110 кВ длиной 30 км и мощности трансформатора 110/10 кВ, составляющей 40 МВА.

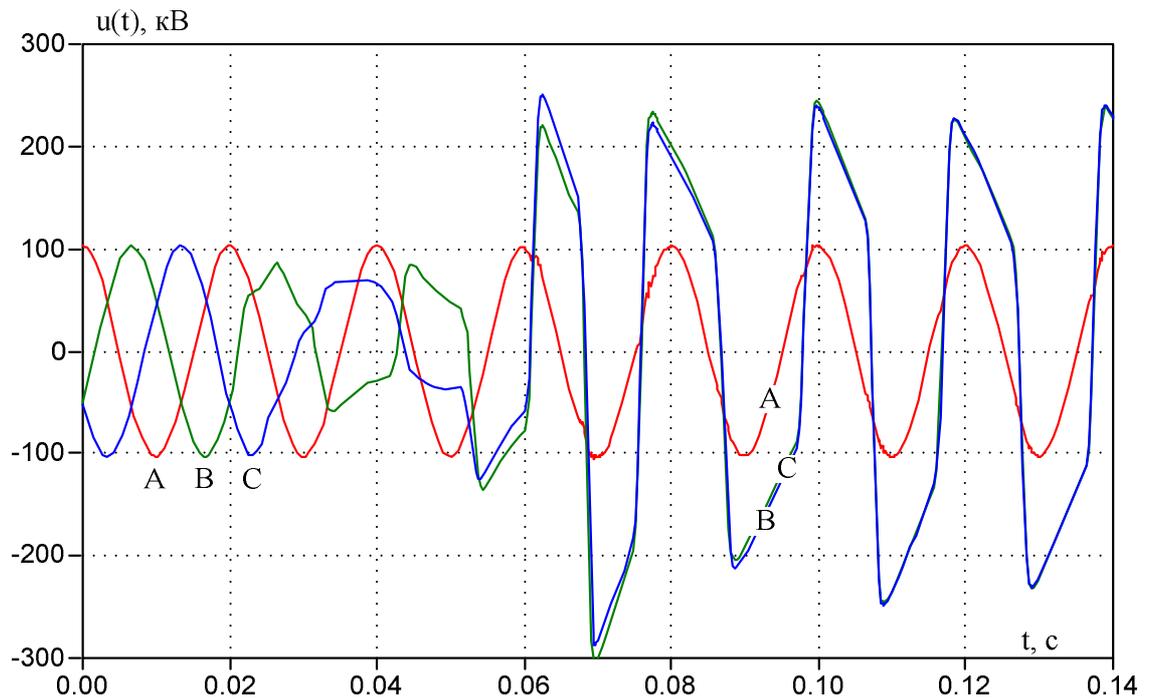


Рис.4.13. Напряжение фаз ВЛ 110 кВ при отключении холостого блока ВЛ-Т от сети 110 кВ в случае, когда фаза «А» не отключилась (нейтраль изолирована).

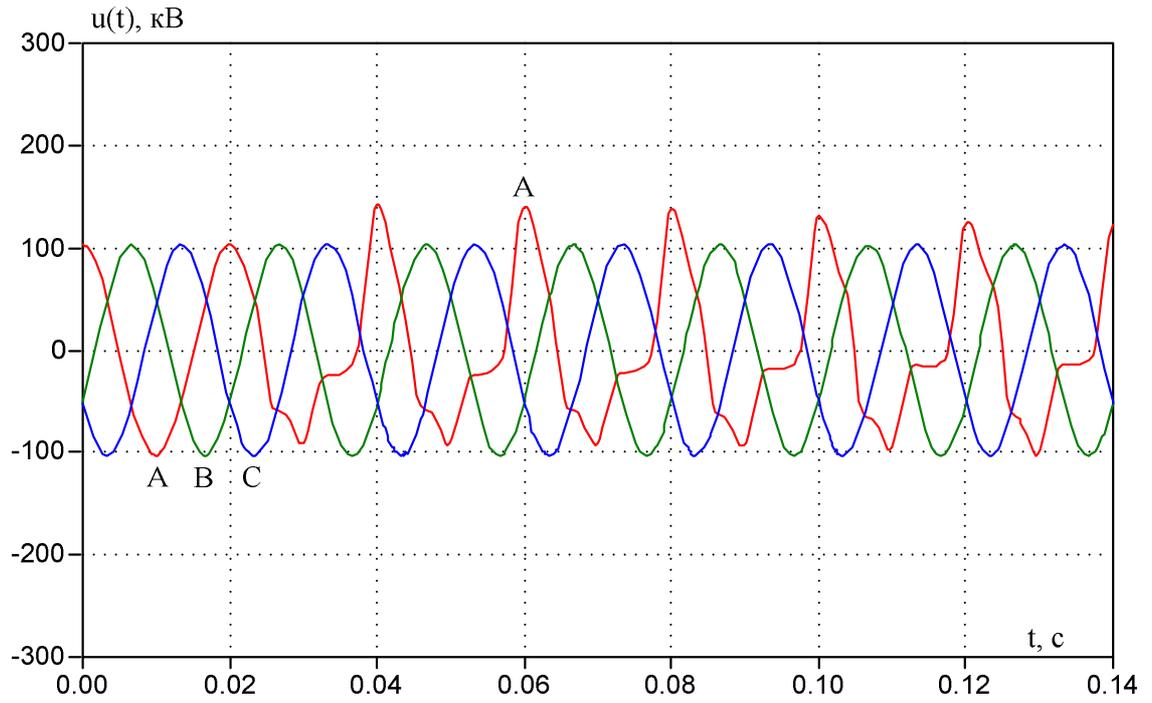


Рис.4.14. Напряжение фаз ВЛ 110 кВ при отключении холостого блока ВЛ-Т от сети 110 кВ в случае, когда фазы «В» и «С» не отключились (нейтраль изолирована).

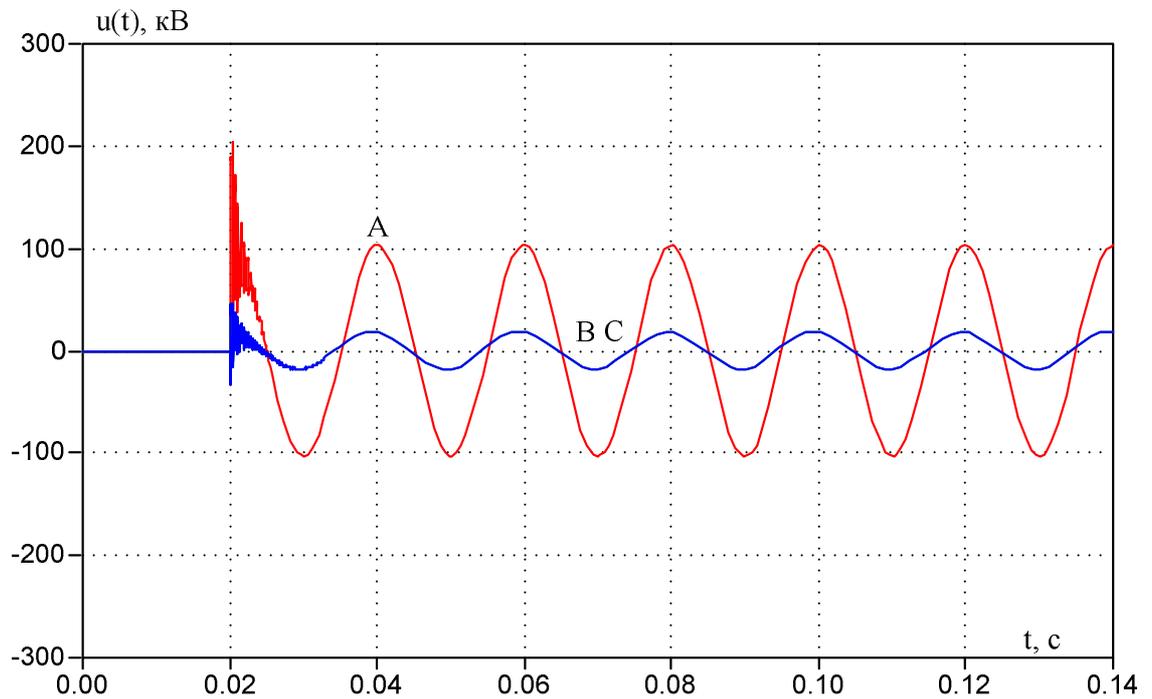


Рис.4.15. Напряжение фаз ВЛ 110 кВ при включении холостого блока ВЛ-Т от сети 110 кВ в случае, когда включилась только фаза «А» (нейтраль изолирована).

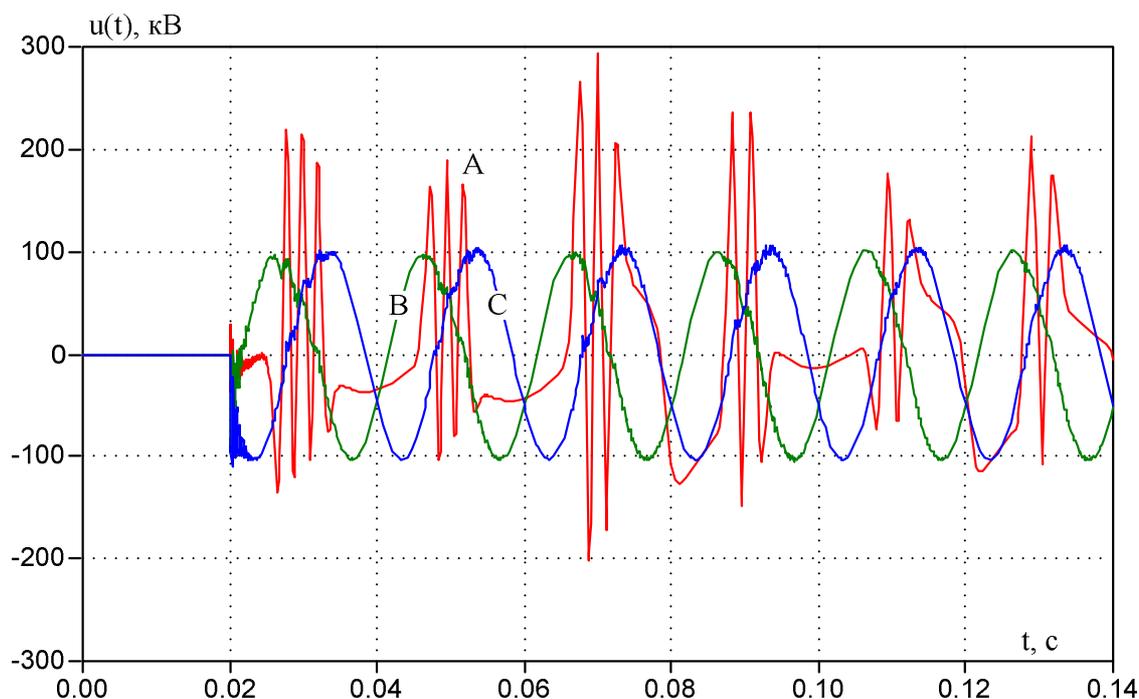


Рис.4.16. Напряжение фаз ВЛ 110 кВ при включении холостого блока ВЛ-Т от сети 110 кВ в случае, когда включились только фазы «В» и «С» (нейтраль изолирована).

Проведенные с использованием программного комплекса ЕМТР исследования показывают, что при неполнофазных режимах питания блока ВЛ-Т с разземленной нейтралью опасные феррорезонансные перенапряжения на отключенных фазах могут возникать в широком диапазоне длин ВЛ и мощностей силовых трансформаторов. Однако на возможность возникновения феррорезонанса и кратности перенапряжений при нем существенное влияние оказывает нагрузка трансформатора: уже при активной нагрузке трансформатора, соответствующей 10% его номинальной мощности, феррорезонансных перенапряжений не возникает.

У силовых трансформаторов в блочной передаче ВЛ-Т установлены защитные аппараты (разрядники или ОПН), предназначенные для ограничения грозовых перенапряжений. После замены вентильных разрядников на ОПН феррорезонансные перенапряжения в случае их возникновения будут воздействовать на ОПН отключенных фаз. Расчеты процессов в случае ненагруженного трансформатора показывают, что за 1 секунду неполнофазного режима, рассмотренного на рис.4.13, в ОПН выделится энергия 400 кДж, а в условиях рис.4.16 – 700 кДж, т.е. около 5.5 и 10 кДж/кВ соответственно.

Проведенный анализ позволил сделать ряд обобщающих выводов:

1. В блочных передачах вида рис.4.11 возможно возникновение опасных феррорезонансных перенапряжений при одновременном стечении следующих обстоятельств:
 - нейтраль трансформатора разземлена;
 - активная нагрузка трансформатора менее 10% его номинальной мощности;
 - имеет место неполнофазный режим включения блока.
2. В случае возникновения феррорезонансных перенапряжений существенным нагрузкам и риску повреждения подвергаются ОПН, установленные у трансформатора. Для снижения риска повреждения ОПН рекомендуются повышенные рабочее напряжение ОПН и его удельная энергоемкость, конкретные значения которых необходимо определять по результатам компьютерных расчетов, аналогичных проведенным выше.
3. Для снижения вероятности возникновения феррорезонансных перенапряжений и снижения риска повреждения ОПН рекомендуется:
 - заземлять нейтраль трансформатора перед осуществлением плановых коммутаций по включению и отключению блока;
 - оснастить блочную передачу защитами от неполнофазных режимов.
4. Для исключения возможности возникновения феррорезонансных перенапряжений рекомендуется не применять блочные передачи вида рис.4.11, а устанавливая выключатель на стороне высокого напряжения трансформатора, что соответствует мировой практике построения высоковольтных сетей.