

## Квазистационарные перенапряжения в блочной передаче 500 кВ и выбор технических характеристик ОПН

(Дмитриев М.В.)

### 1. Введение

Схема блочной передачи, в которой воздушная линия 500 кВ может коммутироваться в блоке с автотрансформатором 750кВ/500кВ выключателями 750 кВ, приведена ниже на рис.1.

В схеме рис.1 рассмотрим возможные квазистационарные перенапряжения, анализ которых позволит правильно выбрать характеристики устанавливаемых на стороне 500 кВ ограничителей перенапряжений типа ОПН.

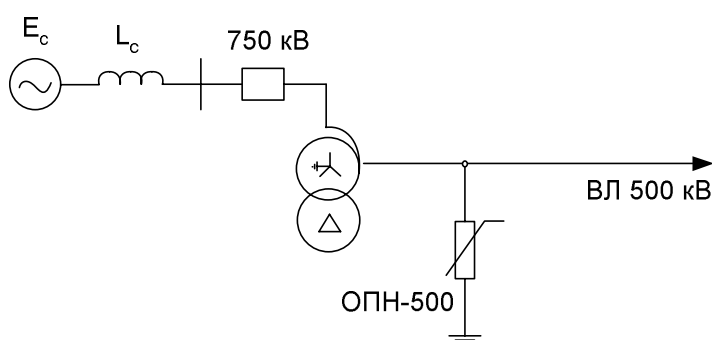


Рис.1. Схема блочной передачи.

### 2. Расчеты перенапряжений на ВЛ 500 кВ

Расчеты перенапряжений проводились в программном комплексе ЕМТР. В расчетах длина ВЛ 500 кВ принята равной 36 км, мощность автотрансформатора принята равной 3х417 МВА (750/500/11 кВ).

При моделировании автотрансформатора учитывалась его третичная обмотка и способ ее соединения. Согласно многочисленным исследованиям нелинейный шунт намагничивания трехобмоточного автотрансформатора наиболее правильно включать на выводе обмотки низкого напряжения (НН). В рассматриваемых автотрансформаторах собственная индуктивность обмотки среднего напряжения (СН) очень мала (равна нулю). Пример расчетной ЕМТР-схемы замещения одной фазы трансформатора приведен на рис.2.

Принципиально можно рассмотреть большое число расчетных случаев. Однако ограничимся лишь одним – отключением холостой ВЛ 500 кВ вместе с автотрансформатором выключателем 750 кВ. Согласно [1] этот случай является наиболее тяжелым, а согласно [2] именно в подобных случаях происходили повреждения ОПН 500 кВ.

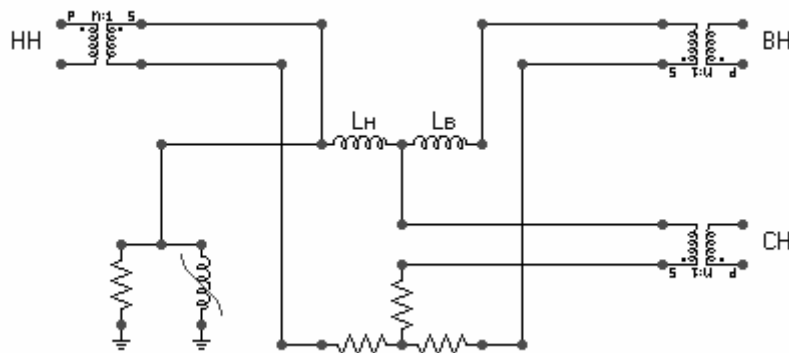


Рис.2. EMTP-схема замещения фазы трехобмоточного автотрансформатора.

### 2.1. Установившийся режим работы холостого блока АТ-ВЛ через одну фазу выключателя 750 кВ (две другие отключены)

Рассмотрим случай, когда в фазы «В» и «С» выключателя 750 кВ уже отключились, а фаза «А» еще нет. При этом на данном этапе не будем учитывать шунты намагничивания, удалив их из схемы, а также положим систему 750 кВ бесконечно мощной.

С использованием метода симметричных составляющих можно получить напряжение на отключенных фазах «В» и «С» автотрансформатора:

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

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

**Третичная обмотка замкнута в треугольник.** Можно показать, что на промышленной частоте  $\dot{Z}_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$  и  $\dot{Z}_0 = j\omega L_{ВН-НН}$  (третичная обмотка замкнута в треугольник), где  $j = \sqrt{-1}$  - мнимая единица,  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота (рад/сек),  $C_1$  - емкость ВЛ 500 кВ нулевой последовательности (приведенная к стороне 750 кВ),  $L_{ВН-НН}$  - индуктивность короткого замыкания пары обмоток ВН и НН (вычисленная на основе паспортных данных трансформатора  $u_k^{ВН-НН}$  и приведенная к стороне 750 кВ). Тогда на промышленной частоте соотношение

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

Поэтому  $\dot{U}_B = \dot{U}_C = -0.5\dot{U}_A$ , т.е. при принятых допущениях напряжение на отключенных фазах 750 кВ автотрансформатора составляет половину напряжения включенной фазе, при этом напряжения включенной и отключенных фаз находятся в противофазе. Этот вывод справедлив и для напряжений на стороне 500 кВ (рис.3).

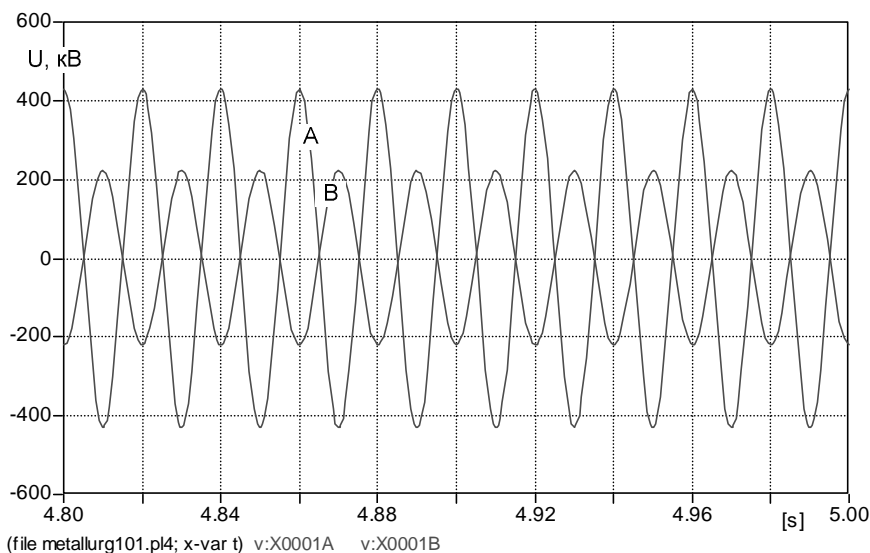


Рис.3. Питание холостого блока АТ-ВЛ (треугольник замкнут) осуществляется только по фазе «А» выключателя 750 кВ. Показано напряжение на ВЛ 500 кВ в фазах «А» и «В».

**Третичная обмотка разомкнута.** Можно показать, что на промышленной частоте  $\dot{Z}_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$  и  $\dot{Z}_0 = \frac{1}{j\omega C_0}$ , где  $C_1$  и  $C_0$  - емкость ВЛ 500 кВ по прямой последовательности (приведенная к стороне 750 кВ). Тогда получим

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

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

Учитывая погонные параметры ВЛ 500 кВ  $C_1^* = 12 \cdot 10^{-12}$  Ф/м и  $C_0^* = 8.8 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, получим  $\dot{U}_B = \dot{U}_C = 0.11\dot{U}_A$ , т.е. при принятых допущениях напряжение на отключенных фазах 750 кВ автотрансформатора составляет приблизительно одну десятую напряжения включенной фазы, 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).

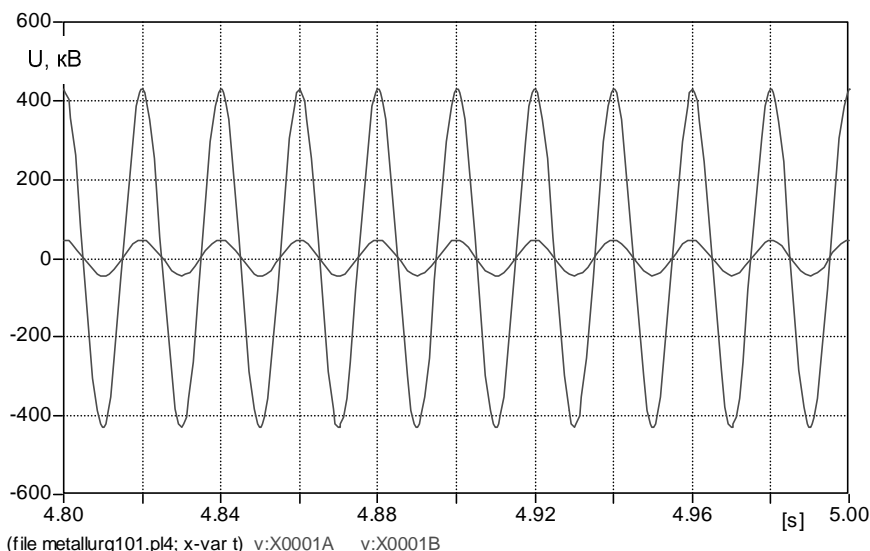


Рис.4. Питание холостого блока АТ-ВЛ (треугольник разомкнут) осуществляется только по фазе «А» выключателя 750 кВ. Показано напряжение на ВЛ 500 кВ в фазах «А» и «В».

## 2.2. Переходный процесс отключения холостого блока АТ-ВЛ с учетом разброса в работе фаз выключателя 750 кВ (без учета намагничивания)

Рассмотрим процессы на ВЛ 500 кВ, сопровождающие отключение фаз «В» и «С» выключателя 750 кВ (фаза «А» не отключается). При этом на данном этапе не будем учитывать шунты намагничивания, удалив их из схемы, а также положим систему 750 кВ бесконечно мощной.

Будем считать, что в установившемся режиме работы холостой ВЛ 500 кВ напряжение фаз относительно земли соответствует наибольшему рабочему напряжению сети, т.е. амплитуда этого напряжения  $E_M = \sqrt{2} \cdot 525 / \sqrt{3} = 428$  кВ.

**Третичная обмотка замкнута в треугольник.** Пусть выключатель 750 кВ гасит дугу сразу после перехода тока через ноль. Пусть вначале гашение тока происходит в фазе «С» выключателя. Учитывая, что третичная обмотка АТ-5 соединена в треугольник, напряжение на линии в фазе «С» практически не изменится по сравнению со случаем симметричного включения всеми тремя фазами.

Теперь рассмотрим процессы при гашении дуги в фазе «В» выключателя 750 кВ (фаза «А» замкнута). Так как отключаемый ток носит емкостной характер, то на момент гашения дуги в выключателе напряжение на ВЛ 500 кВ в отключаемой фазе «В» будет близко к  $E_M$ . Таким образом, в момент времени, непосредственно предшествующий гашению дуги в фазе «В» и отключению этой фазы напряжение на емкости ВЛ этой фазы можно оценить как  $U_{нач} = E_M$  (начальное напряжение на емкости ВЛ 500 кВ).

Ранее было показано, что после отключения двух фаз «В» и «С» выключателя 750 кВ напряжение на линии после затухания переходного процесса станет равным  $\dot{U}_B = \dot{U}_C = -0.5\dot{U}_A$ , т.е. после гашения дуги в фазе «В»

выключателя 750 кВ напряжение на ВЛ 500 кВ в этой фазе (и в фазе «С», которая отключилась ранее) определяется уже напряжением фазы «А».

Начальное напряжение на емкости  $U_{НАЧ} = E_M$  и вынужденная составляющая  $\dot{U}_B = \dot{U}_C = -0.5\dot{U}_A$ , которая появляется после гашения дуги в фазах «В» и «С» выключателя 750 кВ, накладываются друг на друга, что приводит к максимальным перенапряжениям на ВЛ 500 кВ уровня  $1.5E_M$ .

Осциллограммы процессов в фазах ВЛ 500 кВ показаны на рис.5 (на осциллограмме гашение дуги в выключателе происходит в 0.1 сек). Видно, напряжение в фазах после отключения выключателя представляет собой вынужденную составляющую (в противофазе с напряжением фазы «А»), наложенную на апериодическую. Кратность квазистационарных перенапряжений достигает 1.5 о.е.

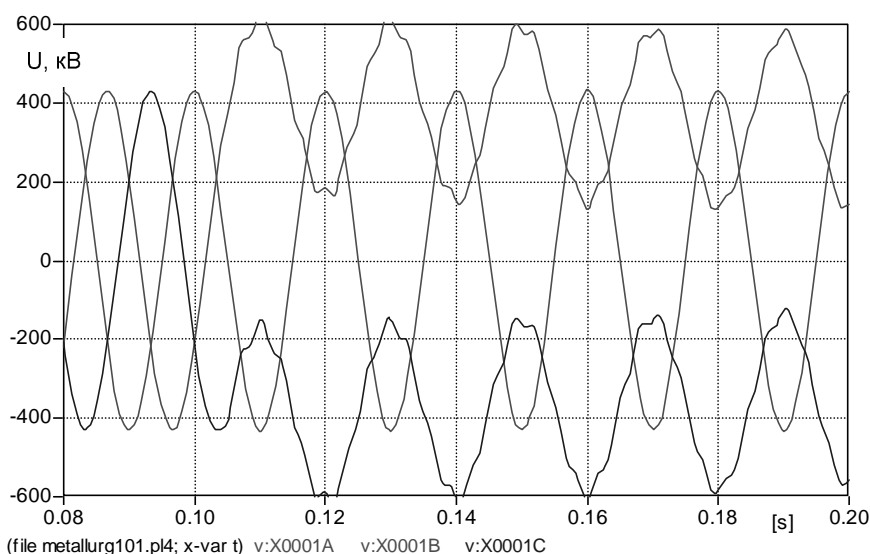


Рис.5. Холостой блок АТ-ВЛ (треугольник замкнут) отключается сначала выключателем фазы «С», а затем выключателем фазы «В» (при этом фаза «А» остается замкнутой). Показано напряжение фаз ВЛ 500 кВ относительно земли.

По рис.5 видно, что переходный процесс затухает относительно медленно. 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 перенапряжений можно считать, что в фазах «В» и «С» на ВЛ 500 кВ держатся перенапряжения уровня  $1.5E_M$ .

Оценить допустимость воздействия такого напряжения на ОПН 500 кВ, установленного на ВЛ 500 кВ, сложно, так как это напряжение носит апериодический характер с наложенными колебаниями промышленной частоты, что затрудняет использование характеристики «напряжение-время», полученной при синусоидальном воздействующем на ОПН напряжении.

**Третичная обмотка разомкнута.** Можно положить  $U_{НАЧ} = E_M$ . Ранее было показано, что после отключения двух фаз «В» и «С» выключателя 750

кВ напряжение на линии после затухания переходного процесса станет равным  $\dot{U}_B = \dot{U}_C = 0.11\dot{U}_A$ , т.е. после гашения дуги в фазе «В» выключателя 750 кВ напряжение на ВЛ 500 кВ в этой фазе (и в фазе «С», которая отключилась ранее) определяется уже напряжением фазы «А».

Начальное напряжение на емкости  $U_{нач} = E_M$  и вынужденная составляющая  $\dot{U}_B = \dot{U}_C = 0.11\dot{U}_A$ , которая появляется после гашения дуги в фазах «В» и «С» выключателя 750 кВ, накладываются друг на друга, что приводит к максимальным перенапряжениям на ВЛ 500 кВ уровня  $(1.10 \div 1.15)E_M$  (рис.6), т.е. существенно меньше, чем в случае замкнутого треугольника.

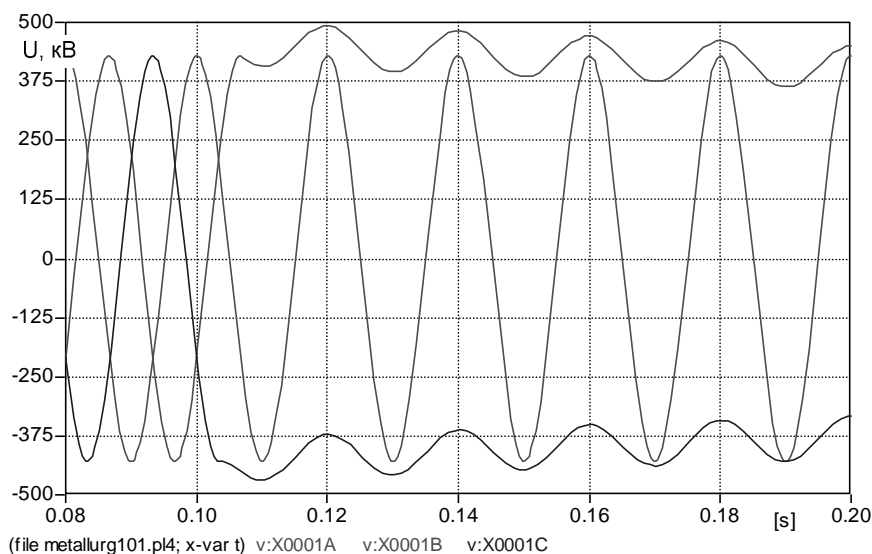


Рис.6. Холостой блок АТ-ВЛ (треугольник разомкнут) отключается сначала выключателем фазы «С», а затем выключателем фазы «В» (при этом фаза «А» остается замкнутой). Показано напряжение фаз ВЛ 500 кВ относительно земли.

### 2.3. Переходный процесс отключения холостого блока АТ-ВЛ с учетом намагничивания и реальных параметров системы

Ранее вывод формул и построение осциллограмм было выполнено для случая бесконечно мощной системы 750 кВ и без учета нелинейных свойств магнитопровода автотрансформатора. Здесь расчеты проведены в полной схеме рис.1 с учетом намагничивания и реальных параметров сети 750 кВ.

**Третичная обмотка замкнута в треугольник.** Было показано, что в этом случае при отключении фаз «В» и «С» выключателя 750 кВ напряжение в фазах «В» и «С» ВЛ 500 кВ существенно повышается. Подобное повышение напряжения приводит к насыщению стали магнитопровода и может вызвать феррорезонанс.

На рис.7 приведена осциллограмма перенапряжений в фазе «В» на ВЛ 500 кВ при отключении только фаз «В» и «С» выключателя 750 кВ (показаны неограниченный перенапряжения, т.е. рассмотрен случай без ОПН 500 кВ).

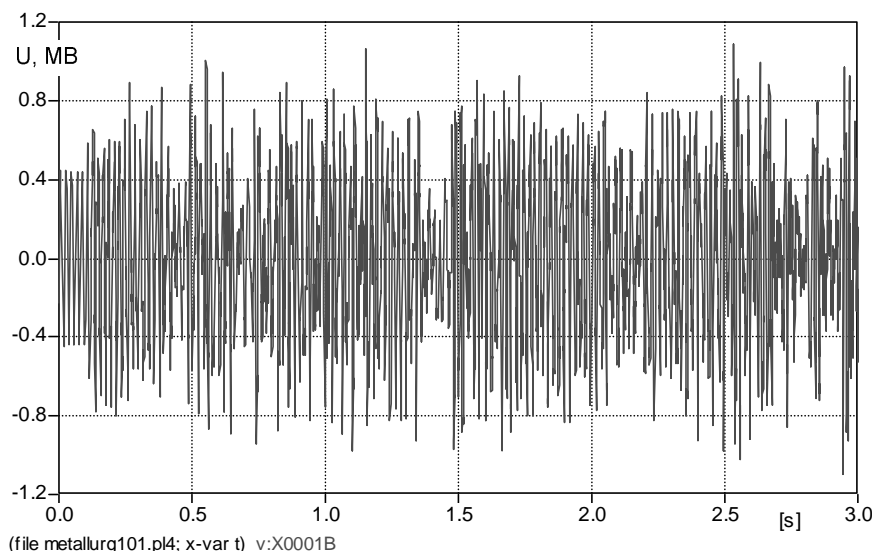


Рис.7. Холостой блок АТ-ВЛ (треугольник замкнут) отключается (в момент 0.1 сек) сначала выключателем фазы «С», а затем выключателем фазы «В» (при этом фаза «А» остается замкнутой). Показано напряжение фазы «В» ВЛ 500 кВ относительно земли.

Из рис.7 видно, что на фазах «В» и «С» (в фазе «С» процессы аналогичны процессам в фазе «В») ВЛ 500 кВ при отключении блока АТ-ВЛ фазами «В» и «С» («А» не отключилась) имеет место феррорезонанс. Аналогичные рис.7 осциллограммы, характеризующиеся такими же кратностями перенапряжений, можно найти и в [1].

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

**Третьичная обмотка разомкнута.** Было показано, что при разомкнутом треугольнике в случае, когда одна из фаз выключателя 750 кВ не отключается, максимальные перенапряжения на ВЛ 500 кВ снижаются по сравнению со случаем замкнутого треугольника.

На рис.8 приведена осциллограмма перенапряжений на ВЛ 500 кВ при отключении только фаз «В» и «С» выключателя 750 кВ (показаны неограниченный перенапряжения в фазе «В», т.е. рассмотрен случай без ОПН 500 кВ). Осциллограмма напряжения в фазе «С» похожа на рис.8 (фаза «В») и здесь не приведена. Осциллограмм напряжения в фазе «А» не приведена, так как перенапряжений в фазе «А» не возникает.

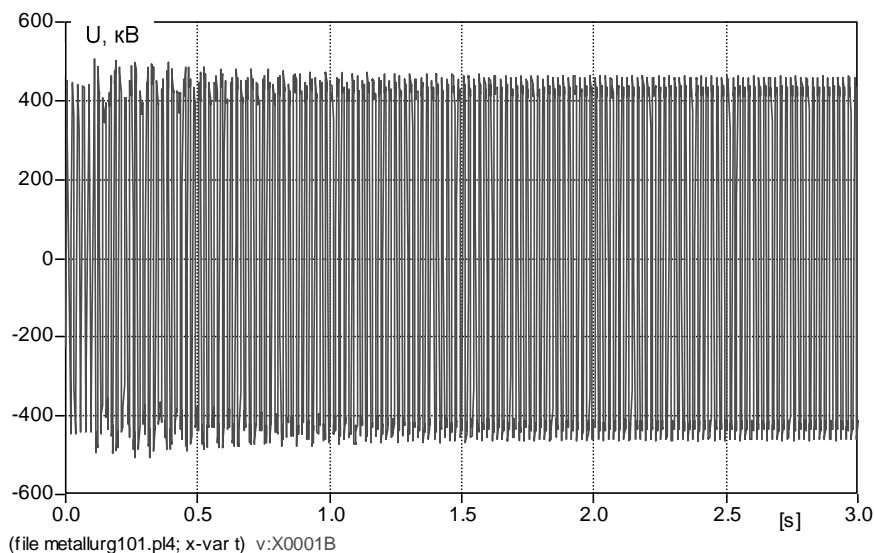


Рис.8. Холостой блок АТ-ВЛ (треугольник разомкнут) отключается (в момент 0.1 сек) сначала выключателем фазы «С», а затем выключателем фазы «В» (при этом фаза «А» остается замкнутой). Показано напряжение фазы «В» ВЛ 500 кВ относительно земли.

### 3. Токовые и энергетические нагрузки на ОПН 500 кВ

Ранее рассматривались неограниченные перенапряжения на ВЛ 500 кВ. Теперь рассмотрим перенапряжения на ВЛ 500 кВ с учетом установленного ОПН 500 кВ с наибольшим рабочим напряжением 333 кВ.

**Третичная обмотка замкнута в треугольник.** На рис.9 приведена осциллограмма токов в ОПН 500 кВ, а на рис.10 приведено изменение во времени выделяющейся в ОПН 500 кВ энергии.

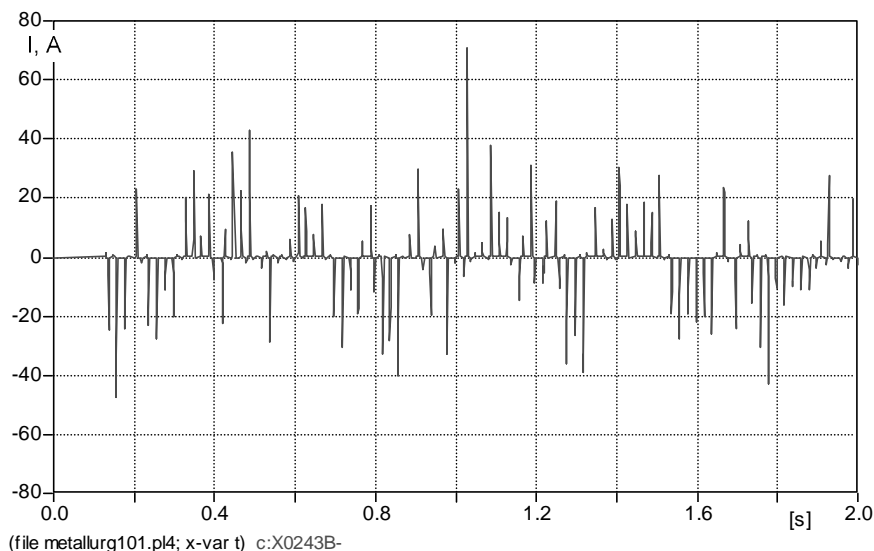


Рис.9. Холостой блок АТ-ВЛ (треугольник замкнут) отключается (в момент 0.1 сек) сначала выключателем фазы «С», а затем выключателем фазы «В» (при этом фаза «А» остается замкнутой). Показаны импульсные токи в ОПН 500 кВ фазы «В».



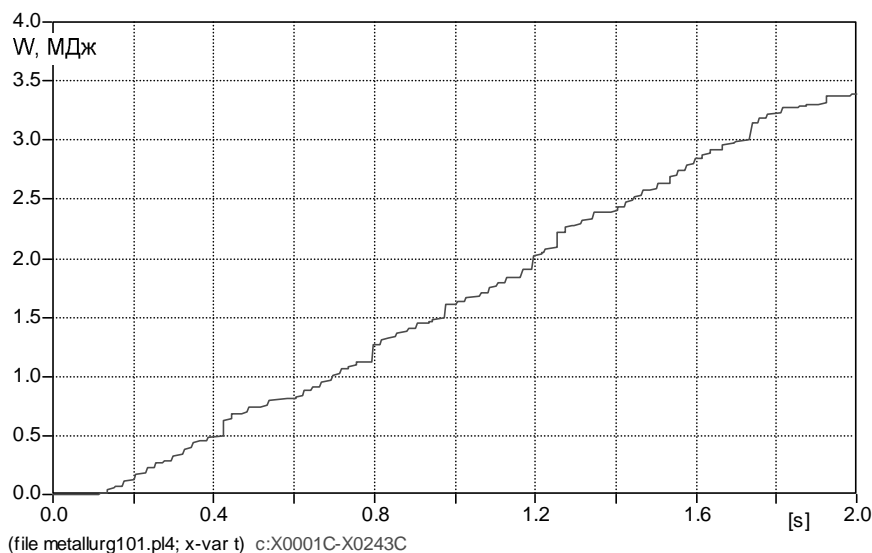


Рис.10. Холостой блок АТ-ВЛ (треугольник замкнут) отключается (в момент 0.1 сек) сначала выключателем фазы «С», а затем выключателем фазы «В» (при этом фаза «А» остается замкнутой). Показано изменение энергии (в МДж) в ОПС 500 кВ фазы «С».

Из рис.9 видно, что импульсные токи в ОПС 500 кВ достигают десятков ампер, а выделяющаяся энергия за 2 сек неполнофазного режима (включена только фаза «А» выключателя 750 кВ) достигает  $3.0 \div 3.5$  МДж, что соответствует приблизительно 10 кДж/кВ.

**Третья обмотка разомкнута.** Опасных токовых и энергетических нагрузок на ОПС 500 кВ не возникает.

#### 4. Выбор рабочего напряжения и энергоемкости ОПС 500 кВ

Опыт эксплуатации схем, аналогичных рис.1, и приведенный в [2] анализ случаев повреждения ОПС 500 кВ в таких схемах свидетельствуют о возможности существования неполнофазных и несимметричных режимов в течении 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 ОПС 500 кВ.

#### 5. Заключение

На токовые и энергетические нагрузки на ОПС 500 кВ в блочной схеме рис.1 в расчетной схеме оказывают влияние характеристики намагничивания автотрансформатора, вольтамперная характеристика ОПС в области малых импульсных токов, коронирование проводов. Точно учесть перечисленные влияющие факторы достаточно сложно. Кроме перечисленных факторов

нагрузки на ОПН определяются, конечно же, длительностью возможных неполнофазных режимов и схемой соединения третичной обмотки автотрансформатора.

Тем не менее, проведенные здесь расчеты, а также данные [1,2], позволяют выработать следующие рекомендации относительно параметров ОПН 500 кВ в схеме рис.1: наибольшее рабочее напряжение ОПН должно быть не менее 333 кВ (характеристика «напряжение-время» соответствующая), а энергоемкость одного импульса не менее 10 кДж/кВ. Даже в случае применения ОПН с такими параметрами рекомендуется тщательная регулировка полюсов выключателя 750 кВ и оснащение схемы рис.1 защитами от неполнофазных выключений (исключает особенно опасные для ОПН длительные неполнофазные режимы).

#### **Список использованных источников**

- [1] Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. «Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них». – Новосибирск, изд-во НГТУ, 2004.
- [2] «Рекомендации по капитальному ремонту средств защиты от перенапряжений оборудования блочной электропередачи 750/500 кВ «ПС Metallургическая – ПС Старый Оскол» Белгородского предприятия МЭС Центра». Отчет с обосновывающими материалами для разработки. Научный руководитель, к.т.н. Лысков Ю.И.