

ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, СОДЕРЖАЩИХ АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И СЕТЯХ ГЕНЕРАТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Кадомская К.П., Петрова Н.Ф.

(Новосибирский государственный технический университет)

Введение. Характерной особенностью электрических сетей, содержащих вращающиеся электрические машины (ЭМ), является относительно низкая электрическая прочность статорной изоляции ЭМ по сравнению с прочностью другого электрооборудования. Вопросы защиты от перенапряжений сетей, содержащих электрические двигатели (сетей собственных нужд электрических станций и других сетей специального назначения: компрессорных и насосных станций магистральных газо- и нефтепроводов, городских сетей системы водоснабжения и др.) были достаточно подробно отражены в периодической печати, в частности в [1]. В настоящей статье на примерах сетей генераторного напряжения блоков электрических станций и передвижных автономных электрических станций (ПАЭС) рассматриваются вопросы защиты от перенапряжений электрических сетей, содержащих генераторы. Генераторы блоков электрических станций выдают мощность на высоком напряжении (рис.1,а), ПАЭС – на генераторном напряжении (рис.1,б).

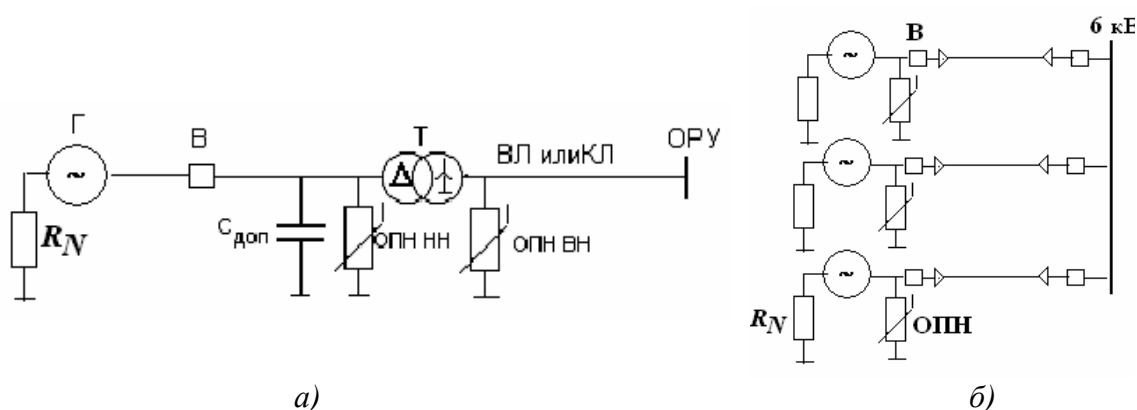


Рис.1. Принципиальные схемы блока электрической станции (а) и секции ПАЭС (б)

Из приведенных схем видно, что в случае связи трансформатора блока с ОРУ ВН с помощью воздушной переключки (рис.1,а) оборудование сети генераторного напряжения необходимо защищать не только от коммутационных, но и от грозовых перенапряжений. В схеме ПАЭС генераторы связаны с сетью 6 кВ с помощью кабелей, которые даже в случае, если от шин ПАЭС отходят воздушные линии 6 кВ, являются не только "самозащищенными" элементами при грозовых поражениях ВЛ, но и элементами, защищающими изоляцию статора генератора от грозовых перенапряжений.

Внутренние перенапряжения в сетях с генераторами и защита от них.

В рассматриваемых сетях от способа соединения нейтрали сети с землей зависят перенапряжения, возникающие в процессе однофазных дуговых замыканий на землю (ОДЗ). Исследования, проведенные многочисленными исследователями, показали, что перенапряжения, возникающие при повторных зажигании дуги, ограничиваются до безопасного уровня при оснащении сети высокоомным резистором, величина сопротивления которого выбирается, исходя из разряда емкости сети через резистор за время порядка половины периода промышленной частоты. Следовательно, при оснащении нейтралей генераторов высокоомными неотключаемыми сопротивлениями не требуется специальной защиты изоляции генераторов от перенапряжений при ОДЗ.

Требования к величинам сопротивлений в нейтрали генератора блока и к их энергоемкости при широком диапазоне изменения входных емкостей генераторов (как гидрогенераторов, так и турбогенераторов) приведены в табл.1.

Таблица 1

Требования к параметрам резисторов в нейтральных генераторов блоков электрических станций

C_{Φ} , мкФ	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
R_N , Ом	5300	2650	1770	1325	1060	885	760	665
$W_{OДЗ}$, кДж	1,5	2,0	4,0	6,4	9,0	11	14	17
$W_{OЗЗ}$, кДж	7,8	15,6	23,4	31,2	39,0	46,7	54,4	62,2

Из таблицы видно, что энергоемкость резисторов определяется стационарным режимом однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), длительность которого принята равной времени действия быстродействующей релейной защиты ($\cong 0,5 - 0,6$ с). В схемах ПАЭС из-за относительно малой емкости генераторов мощностью порядка 2500 кВт сопротивления резистора в нейтрали составляет величину порядка 6500 Ом.

Способ соединения нейтрали сети с землей несущественно сказывается на уровнях перенапряжений, возникающих при коммутациях включения и отключения генераторными выключателями. Именно последние перенапряжения при резистивном заземлении генераторов и определяют требования к защитным аппаратам типа ОПН, устанавливаемым на стороне генераторного напряжения (рис.1).

Перенапряжения, возникающие при включении генераторного выключателя (ГВ).

Опасные для изоляции электрооборудования сети перенапряжения могут возникнуть лишь при так называемой "грубой" синхронизации генератора с сетью, т.е. в случае, если включение генератора происходит в момент, когда векторы э.д.с. генератора и напряжения на шинах разошлись на угол, близкий к 180° .

Расчетная схема для анализа перенапряжений при включении генератора приведена на рис.2.

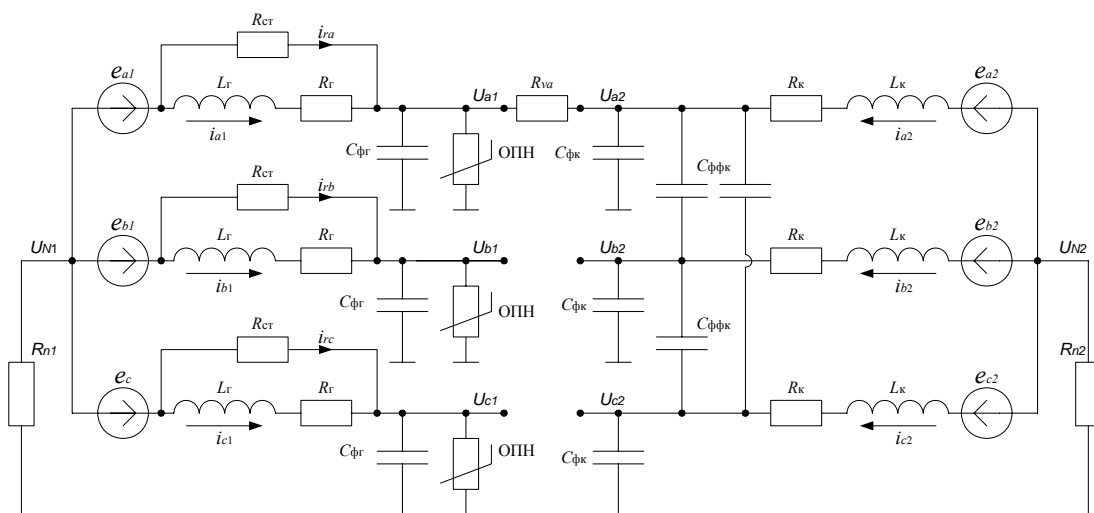


Рис.2. Расчетная схема при включении первого полюса генераторного выключателя

Поскольку включение полюсов выключателя практически всегда происходит неодновременно, то в качестве расчетных принимались перенапряжения, возникающие при включении первого полюса выключателя. При таком включении происходит наибольшее "смещение" нейтрали и, следовательно, возникают наибольшие перенапряжения на не включенных фазах с обеих сторон выключателя. Очевидно, что кратности перенапряжений относительно земли на оборудовании, расположенном с той

или другой стороны выключателя, определяются величиной напряжения на соответствующей нейтрали сети (на нейтрали генератора и на условной нейтрали обмотки НН силового трансформатора блока, соединенной в треугольник, или секции шин 6 кВ в схеме ПАЭС). Это напряжение можно оценить по простейшим зависимостям:

$$U_{1N} = U_{Bm} \frac{C_{\text{фк}(mp)}}{C_{\text{фк}(mp)} + C_{\text{фг}}}, U_{2N} = U_{Bm} \frac{C_{\text{фг}}}{C_{\text{фк}(mp)} + C_{\text{фг}}}, \quad (1)$$

где $U_{Bm} = 2U_{\text{фм}} \sin \delta / 2$.

В схеме блока емкость обмотки НН силового трансформатора существенно меньше входной емкости генератора ($C_r / C_{\text{тр}} = 20 \dots 120$). В схеме ПАЭС, наоборот, емкость кабеля существенно больше емкости генератора ($C_r / C_k = 0,04 \dots 0,06$). Следовательно, в схеме блока $U_{N1} / U_{N2} = 0,008 \dots 0,05$, а в схеме ПАЭС это отношение близко к единице. Поэтому в схеме блока со стороны генератора, а в схеме ПАЭС – со стороны кабеля перенапряжений не возникает. Следовательно, в схеме блока электрической станции ОПН следует устанавливать на стороне низшего напряжения силового трансформатора, т.е. после выключателя, а в схеме ПАЭС – непосредственно на генераторе. Поскольку в схеме блока электрической станции перенапряжения в режиме синхронизации возникают со стороны обмотки низшего напряжения силового трансформатора, характеризуемой достаточно высокой электрической прочностью (порядка $4U_{\text{фм}}$), то уровни перенапряжений оказываются меньше этого допустимого уровня. Поэтому параметры ОПН в схеме блока следует выбирать (в случае воздушной перемычки между трансформатором блока и ОРУ ВН), исходя из условий ограничения грозовых перенапряжений. Приведем требуемые параметры ОПН, устанавливаемых у генераторов на ПАЭС. В табл.2 приведены результаты расчетов ограниченных перенапряжений, возникающих при включении генератора ПАЭС в режиме "грубой" синхронизации. В таблице приведены результаты расчетов для ОПН, изготавливаемых различными фирмами, а также для ОПН, характеристики которого предложены при выполнении настоящей работы в НГТУ (опорная точка ВАХ ОПН – $2.6U_{\text{фм}}$ при токе 250 А).

Таблица 2

**Требования к ОПН, устанавливаемых у генераторов ПАЭС
при оснащении их нейтралей резисторами**

Характеристики	Без ОПН	Феникс (Новосиб.)	Таврида-Электрик (Москва.)	Комета энерго-маш (Новосиб.)	Предлагаемый (НГТУ)
$U / U_{\text{фм}}$	3,06	2,47	2,55	2,73	2,22
Ток ОПН, А	-	5,46	4,9	3,64	8,7
$W_{\text{ОПН}}$, кДж/кВ	-	8,5e-3	6,1e-3	1,63e-3	0,015
$P_{\text{рез}}$, кВт	22,6	15,6	16,5	18,6	14,4

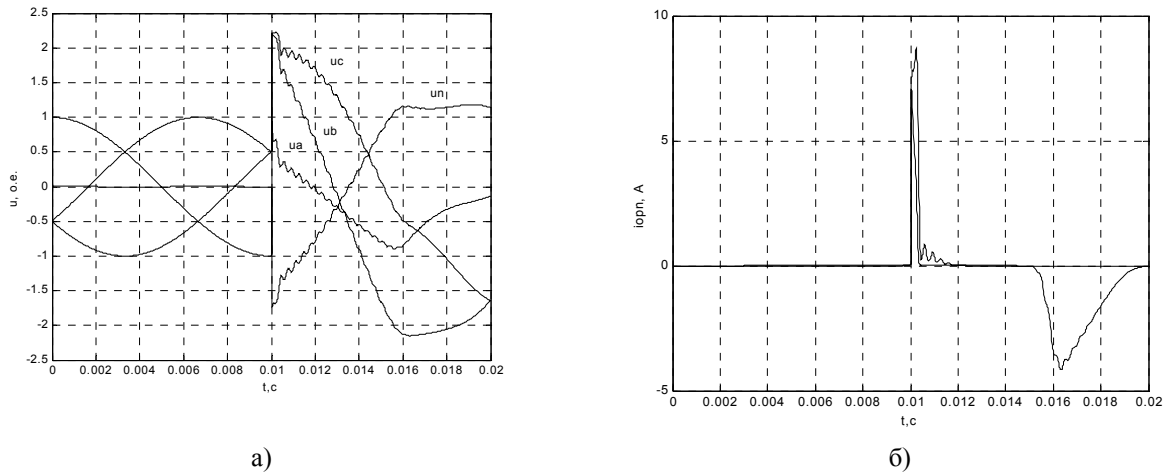


Рис.3. Включение в режиме синхронизации генератора ПАЭС;
(а) – напряжения на фазах и на нейтрали, (б) – токи в ОПН

Расчетные осциллограммы при неполнофазном включении генератора ПАЭС, оснащенного резистором в нейтрали и ОПН на выводах, приведены на рис.3.

Перенапряжения, возникающие при отключении генераторного выключателя. Эти перенапряжения зависят не только от схемы отключаемого присоединения, но и от характеристик дугогасительной среды генераторного выключателя. В настоящее время в схемах блоков генераторного напряжения используются, как правило, воздушные выключатели, в схемах ПАЭС – масляные выключатели. При оснащении ПАЭС масляными выключателями опасных повторных зажиганий дуги в выключателе при его отключении не наблюдается. При использовании в схемах блоков воздушных выключателей успешное отключение происходит за счет установки на стороне НН трансформатора блоков дополнительных конденсаторов, предназначенных для ограничения грозовых перенапряжений при набегании на блок по воздушной перемычке срезанных волн. Установка элегазовых выключателей в блоках также предполагает одновременную установку дополнительных конденсаторов. Анализ возможности использования элегазовых выключателей в схемах ПАЭС показал, что высокая скорость восстановления электрической прочности элегаза после погасания дуги практически исключает её повторные зажигания. Следовательно, высокие кратности перенапряжений при отключении могут возникнуть лишь при оснащении сети генераторного напряжения выключателями с жестким дугогашением, т.е. способными отключать ток, содержащий в основном высокочастотную составляющую, возникшую при повторном зажигании дуги в выключателе. В этом случае возникает так называемая эскалация перенапряжений. В настоящее время вакуумные выключатели в мировой электроэнергетической практике стали внедряться и в схемах достаточно мощных блоков. ОПН, установленные в сети генераторного напряжения могут ограничить перенапряжения относительно земли. Однако исследования показывают, что при этом градиентные перенапряжения, возникающие на продольной изоляции обмотки статора, превосходят уровень, допустимый для витковой и катушечной изоляции этой обмотки. Поэтому при проектировании дугогасящей камеры вакуумных выключателей следует обеспечивать такую скорость восстановления электрической прочности, при которой не будет наблюдаться повторных зажиганий дуги в вакуумной дугогасительной камере (ВДК). Возрастание электрической прочности в ВДК после погасания дуги обычно описывается в виде: $u_{эл.пр.}(t) = k(t + t_0)$, где k – скорость восстановления электрической прочности, t_0 – время между началом расхождения контактов и прохождением тока промышленной частоты через нулевое значение. На рис.4 приведены области в координатах $k-t_0$, при

которых не будет наблюдаться повторных зажиганий дуги в ВДК генераторного выключателя блока при различных точках трехфазного к.з. в блоке (1 – за трансформатором, 2 – между трансформатором и выключателем, 3 – у генератора). Аналогичные области для генераторного выключателя на ПАЭС приведены на рис. 5.

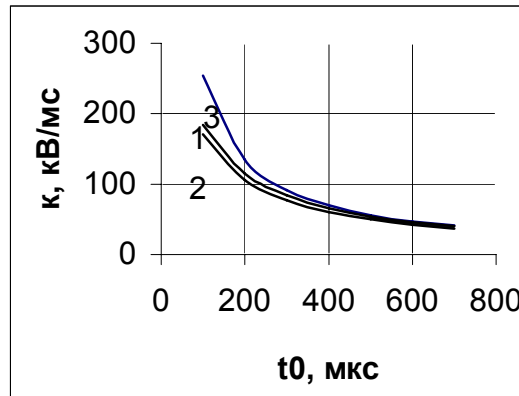


Рис.4. Области параметров ВДК, при которых не наблюдается повторных зажиганий дуги при отключении блока.

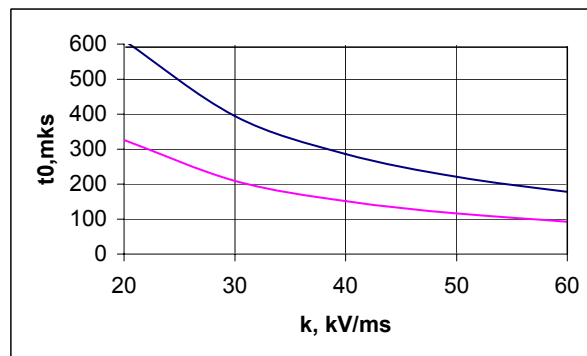


Рис.5. Области параметров ВДК, при которых не наблюдается повторных зажиганий дуги при отключении генератора на ПАЭС

Полученные требования к ВДК не являются чрезмерными, так как согласуются с достижениями в области вакуумных выключателей ведущих мировых фирм (в частности, фирмы *SIEMENS*).

Грозовые перенапряжения в сети генераторного напряжения блоков электрических станций. Расчетная схема при ударе молнии в воздушную перемычку, связывающую силовой трансформатор блока с ОРУ ВН, приведена на рис.6,а. На рис.6,б приведена модель силового трансформатора блока.

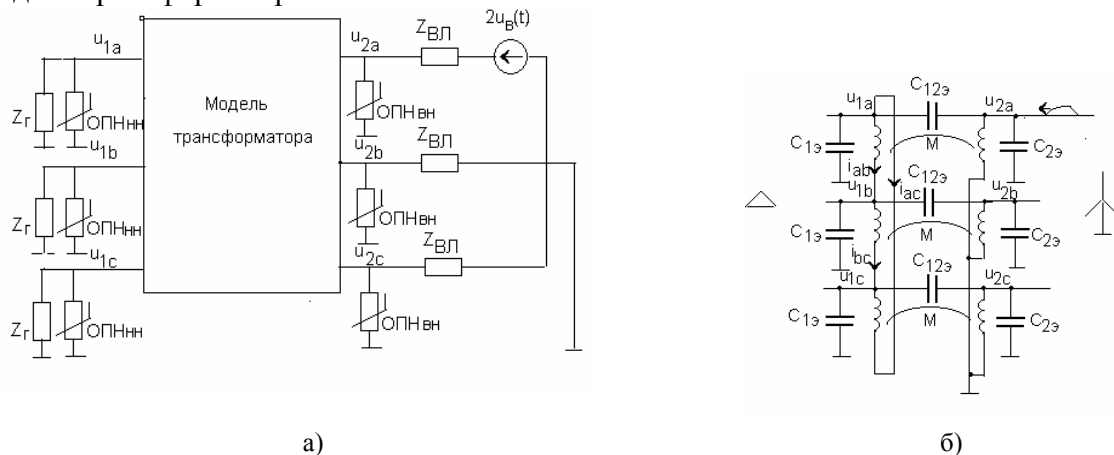


Рис.6. Расчетная схема при исследовании грозовых перенапряжений в схеме блока (а) и модель силового трансформатора (б)

В случае набегания на трансформатор срезанных волн их переход на сторону генераторного напряжения определяется электростатическими связями между обмотками трансформатора, при этом коэффициент деления в первом приближении может быть оценен как $k_{э.ст.} = C_{12} / (C_{12} + C_1)$. При воздействии полных волн импульс напряжения на стороне генераторного напряжения содержит два максимума: первый максимум определяемый, в основном, электростатическими связями между обмотками трансформатора, второй – электромагнитными связями, характеризуемыми коэффициентом трансформации трансформатора $k_{э.м.} = U_{НН} / U_{ВН}$. Поскольку $k_{э.ст.} \gg k_{э.м.}$ (в рассмотренном блоке $k_{э.ст.} = 0,55$, $k_{э.м.} = 15,75/500 = 0,03$), срезанные волны оказываются более опасными для изоляции оборудования генераторного напряжения, чем полные. При воздействии срезанных волн с помощью ОПН ВН, установленного со стороны обмотки высшего напряжения, невозможно ограничить перенапряжения на стороне генераторного напряжения до допустимого уровня. Это обусловлено большим коэффициентом $k_{э.ст.}$, обеспечивающим упреждающее "срабатывание" ОПН НН по сравнению с ОПН ВН. При воздействии полных волн "срабатывание" ОПН ВН обеспечивает приемлемый уровень грозовых перенапряжений на стороне генераторного напряжения. Для обеспечения надежной грозоупорности генератора блока при воздействии срезанной волна на стороне обмотки НН трансформатора устанавливаются специальные безындуктивные конденсаторы емкостью порядка 0,1 – 0,2 мкФ. Следовательно, установка ОПН в сети генераторного напряжения блока при оснащении генератора высокоомными резисторами требуется лишь для ограничения грозовых перенапряжений, возникающих при воздействии полных волн с крутыми фронтами.

Выводы.

1. Исключение опасных перенапряжений в сетях генераторного напряжения как блоков электрических станций, так и ПАЭС при ОДЗ достигается путем высокоомного заземления нейтралей генераторов.
2. В сетях генераторного напряжения блока ОПН следует устанавливать на стороне НН трансформатора блока, а в схемах ПАЭС – непосредственно на выводах генераторов.
3. В сетях генераторного напряжения блоков, нейтрали которых оснащены высокоомными резисторами, на ОПН возлагается лишь защита статорной изоляции генератора при воздействии полных волн с крутыми фронтами. При этом эти ОПН будут "срабатывать" и при грубой синхронизации блока, хотя перенапряжения, возникающие при этом на стороне НН трансформатора блока, где установлен ОПН, не достигают уровня опасного для изоляции обмотки НН трансформатора. Расчеты показывают, что энергоемкость ОПН в этом случае отвечает ОПН 1 – 2 групп, а опорная точка ВАХ ОПН отвечает остающемуся напряжению порядка $2,8 U_{фм}$ при токе 3 – 5 кА (в зависимости от напряжений сети генераторного и высшего напряжения блока).
4. В сетях генераторного напряжения ПАЭС при оснащении нейтралей генераторов высокоомными резисторами с сопротивлением порядка 6500 Ом (мощность резистора порядка 30 кВт), характеристики ОПН выбираются, исходя из требуемого уровня ограничения перенапряжений, возникающих при "грубой" синхронизации генераторов. При этом длительно выдерживаемое напряжение ОПН $U_c = 6,6$ кВ; опорная точка ВАХ ОПН $U_{ост} = 13,5$ кВ при $I_{опнм} = 250$ А; удельная энергия, поглощаемая защитными аппаратами во время единичного "срабатывания" $W_{уд} = W_{опн} / U_c \cong 0,15$ кДж/кВ, что отвечает первой группе аппаратов по этому параметру.
5. В случае оснащения блоков электрических станций и ПАЭС вакуумными выключателями скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка в ВДК должна обеспечивать отсутствие повторных зажиганий, приводящих к недопустимо большим витковым перенапряжениям. Этому условию

при упреждении момента начала расхождения контактов момента прохождения отключаемого тока промышленной частоты через нулевое значение порядка 300 мкс отвечает скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка в ВДК не менее 60 – 80 кВ/мс.

Литература.

1. **Дегтярев И.Л., Кадомская К.П., Копылов Р.В.** Режимы заземления нейтрали и защита от перенапряжений электрических сетей с вращающимися электрическими машинами. Тр. Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ».-Новосибирск.-15-17 октября 2002.-С.147-152.