

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДВЕСНЫХ ОПН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ГРОЗОУПОРНОСТИ ВЛ 110–220 кВ

МАТВЕЕВ Д. А. Старший преподаватель МЭИ (ТУ)

ГИЛЯЗОВ М. З. Инженер МЭИ (ТУ)

В статье рассмотрена актуальная на сегодняшний день задача повышения грозоупорности воздушных линий электропередачи с помощью ОПН подвесного типа, устанавливаемых на опорах линии параллельно гирляндам изоляторов. На основании результатов численного моделирования проанализировано влияние схем расстановки ОПН по линии на число грозовых отключений. Отдельное внимание уделено подходу к оценке энергетических воздействий на ОПН, определяющих выбор класса пропускной способности ограничителей. Отмечены направления научных исследований, необходимых для создания инженерной методики выбора параметров ОПН.

Необходимость повышения эффективности молниезащиты ВЛ 110–220 кВ остается актуальной задачей из-за относительно большого числа отключений, обусловленных ударами молнии. В ряде случаев традиционные методы молниезащиты ВЛ принципиально не позволяют обеспечить необходимо малое число грозовых отключений. К таким случаям относятся:

- линии или участки линий, проходящие в районах с высоким удельным сопротивлением грунта (каменистый грунт, вечная мерзлота) или с высокой грозовой активностью;
- участки линий на высоких опорах (большие переходы через водные преграды);
- линии, с высокими гололедно-ветровыми нагрузками для тросов.

В последнем случае нередкой является эксплуатация ВЛ со снятыми молниезащитными тросами, что кардинально ухудшает условия молниезащиты.

Допустимое число грозовых отключений часто не может быть достигнуто традиционными методами для ВЛ на двухцепных (и более) опорах и в случаях электроснабжения особо ответственных объектов.

Большое число импульсных перекрытий гирлянды изоляторов может быть скомпенсировано быстродействующими АПВ, которое оказывается успешным в 80–90 % случаев. Однако частое срабатывание выключателей

расходует их собственный ресурс, а также ресурс подстанционного оборудования, из-за возникающих коммутационных перенапряжений. Затраты на совершенствование молниезащиты ВЛ в большинстве случаев могут дать положительные экономический и, безусловно, технический эффекты.

Мероприятия по повышению эффективности систем молниезащиты ВЛ следует рассматривать отдельно для действующих и проектируемых объектов.

Для действующих линий при наличии недопустимо большого числа грозовых отключений наиболее эффективными являются три решения:

- ревизия, модернизация или замена заземлителей опор ВЛ;
- увеличение импульсной прочности гирлянд изоляторов;
- установка на ВЛ подвесных ОПН.

Эффективность модернизации или замены заземлителей опор зависит от их текущего состояния и удельного сопротивления грунта. Увеличение импульсной прочности линейной изоляции оказывается эффективным только для ВЛ на опорах с малыми импульсными сопротивлениями заземления. Поэтому в случаях плохо проводящих грунтов установка подвесных ОПН оказывается единственным, но при этом радикальным методом повышения грозоупорности.

В мировой практике имеется успешный опыт эксплуатации подвесных ОПН, особенно для ВЛ напряжением 66 – 77 кВ. Хороший аналитический обзор мирового опыта содержится в работе [2].

Внедрение в эксплуатацию подвесных ОПН на отечественных ВЛ затруднено по причине полного отсутствия методических и нормативных документов, регламентирующих выбор подвесных ОПН. В связи с этим в России ведутся исследования в этой области [1-3]. В частности, на кафедре ТЭВН МЭИ в течение последних шести лет ведутся работы по созданию методических основ и программного обеспечения для выбора подвесных ОПН и определения эффективности их применения. К настоящему времени разработаны расчетные модели, позволяющие определить число грозовых отключений при заданной расстановке подвесных ОПН на ВЛ, а также число лет безаварийной работы самих ОПН, подвергающихся энергетическим нагрузкам с учетом статистического характера параметров тока молнии. Данные модели включают в себя случаи удара молнии в опору, в трос в середине пролета и в фазный провод при прорыве сквозь тросовую защиту.

В целом имеющиеся наработки позволяют определить технический и экономический эффект от установки подвесных ОПН на ВЛ (или ее участках). Поскольку в России установка подвесных ОПН до сих пор не нашла широкого применения (имеется лишь небольшой экспериментальный опыт) [2], то необходимо четко определить и технические требования к подвесным ОПН.

Целью настоящей статьи является ознакомление читателя с возможностями применения подвесных ОПН на ВЛ 110 – 220 кВ, с их влиянием на число грозовых отключений. Далее в статье мы обратим внимание на проблемы, которые надо преодолеть на пути создания методики выбора подвесных ОПН на ВЛ.

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ПОДВЕСНЫХ ОПН НА ГРОЗОУПОРНОСТЬ ВЛ

Грозоупорность ВЛ с молниезащитными тросами характеризуется удельным числом грозовых отключений на 100 км и на 100 грозовых часов, которое определяется случаями удара молнии в опору, в трос в середине пролета и прорыва молнии к фазным проводам [4]:

$$n_r = n_{оп} + n_{тр} + n_{пр}, \quad (1)$$

Удельное число грозовых отключений для каждого из этих случаев определяется по формуле [1]:

$$n = \eta NP^*, \quad (2)$$

где N – число ударов в опору; P^* – вероятность перекрытия линейной изоляции с учетом установки подвесных ОПН; η – коэффициент перехода импульсного перекрытия в дугу промышленной частоты.

Вероятность перекрытия линейной изоляции существенно зависит от числа ОПН на ВЛ и схемы их расстановки. Подвесные ОПН могут быть установлены во всех фазах каждой опоры, или с пропуском опор (одной или нескольких), или с защитой только части гирлянд на каждой опоре.

Вероятность перекрытия гирлянды изоляторов, параллельно которой установлен ограничитель, при правильной координации между вольт-секундной характеристикой (ВСК) гирлянды и искрового промежутка (при его наличии) с вольт-амперной характеристикой (ВАХ) ОПН, стремится к нулю. Поэтому установка ОПН во всех фазах каждой опоры позволяет практически полностью исключить грозовые отключения ВЛ. В этом случае необходимо решать лишь вопрос термической стойкости ограничителя, которая и будет полностью определять статистику грозовых отключений ВЛ.

В случае расстановки ОПН не на всех опорах и/или фазах возможны перекрытия гирлянд изоляторов и вероятность перекрытия должна определяться расчетным путем. Вероятность обратного перекрытия гирлянды изоляторов с учетом установки подвесных ОПН на всех фазах каждой k -ой опоры рассчитывается по формуле:

$$P_{оп}^* = \frac{1}{k} P_{оп}^{опн} + \frac{k-1}{k} P_{оп}, \quad (3)$$

где $P_{оп}^{опн}$ и $P_{оп}$ – вероятности обратного перекрытия при ударе молнии в опору с и без подвесных ОПН, соответственно; k – периодичность расстановки подвесных ОПН на опорах ($k=1$ – на каждой опоре; $k=2$ – на каждой второй опоре и т.д.).

Так, если принять, что при установке подвесных ОПН во всех фазах на каждой второй опоре ($k=2$) $P_{оп}^{опн} \approx 0$, то установка ОПН позволяет в два раза сократить число грозовых отключений. В действительности, значение $P_{оп}^{опн}$ отлично от нуля, так как существует возможность перекрытия гирлянд на соседних опорах. При этом наличие ОПН на соседних опорах влияет на величину $P_{оп}^{опн}$, уменьшая ее. Таким образом, строгую оценку эффективности подвесных ОПН можно сделать только на основании численного моделирования.

Аналогично рассчитывается удельное число грозовых отключений при ударе в трос в середине пролета, только вероятность обратного перекрытия гирлянды изоляторов с учетом установки подвесных ОПН определяется по формуле:

$$P_{тр}^* = \frac{2}{k} P_{тр}^{опн} + \frac{k-2}{k} P_{тр}, \quad (4)$$

где $P_{тр}^{опн}$ – вероятность обратного перекрытия при ударе молнии в трос в середине пролета между опорами с и без подвесных ОПН, а $P_{тр}$ – между опорами без подвесных ОПН.



Матвеев Даниил Анатольевич

Организация: МЭИ (ТУ)

Должность: старший

преподаватель

E-mail: dmatveev@facts-plus.com



Гиязов Марат Закирьянович

Организация: МЭИ (ТУ)

Должность: инженер

E-mail: gilyazovmz@inbox.ru

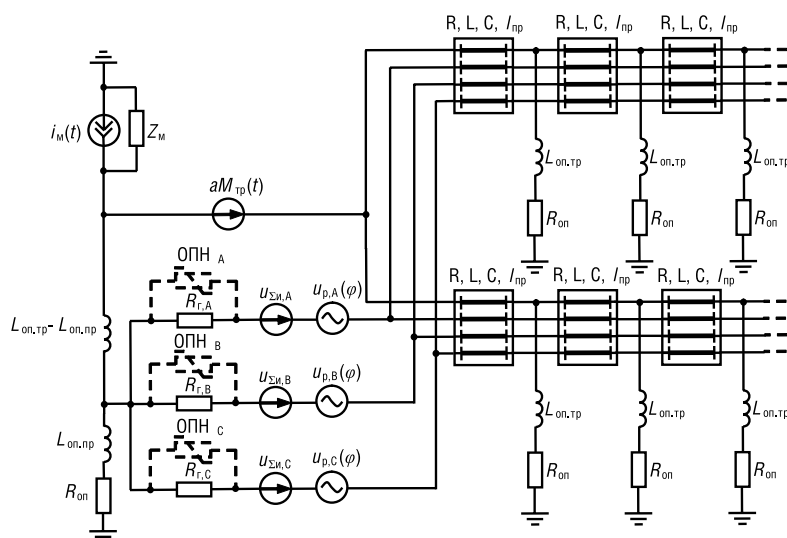


Рис. 1. Расчетная схема замещения для определения напряжений на гирляндах изоляторов при ударе молнии в опору ВЛ с подвесными ОПН

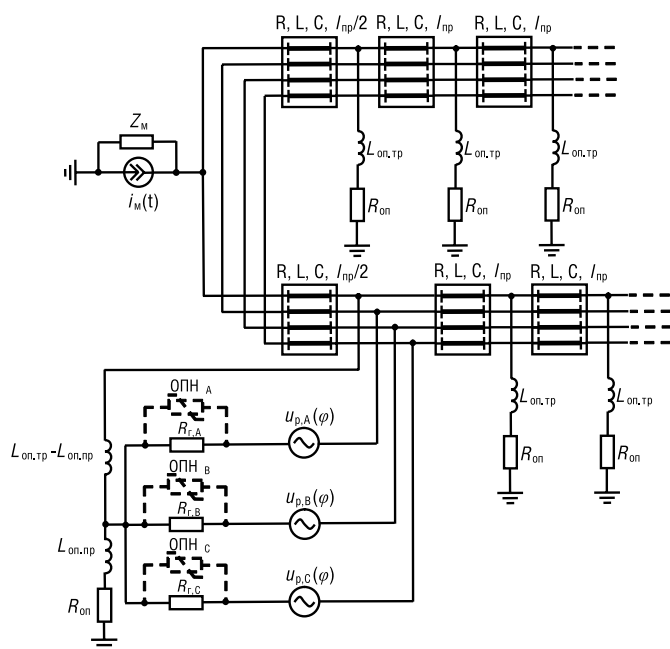


Рис. 2. Расчетная схема замещения для определения напряжений на гирляндах изоляторов при ударе молнии в трос ВЛ с подвесными ОПН

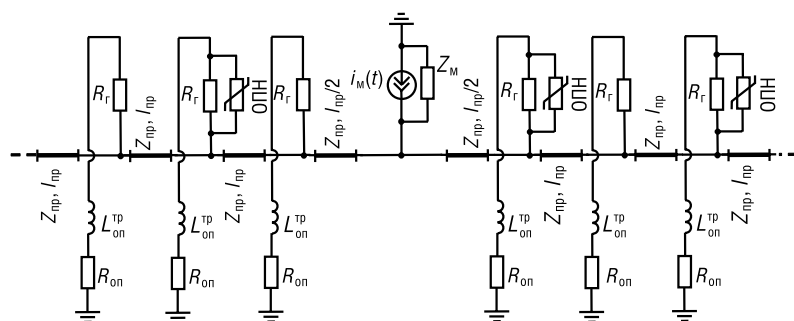


Рис. 3. Расчетная схема замещения для определения напряжений на гирляндах изоляторов и энергий, рассеиваемых в ОПН, при ударе молнии в фазный провод

По оценке авторов, при наличии на ВЛ тросовой защиты числом грозовых отключений при прорывах молнии через тросовую защиту можно пренебречь.

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

Для определения вероятностей перекрытия линейной изоляции ВЛ с подвесными ОПН при ударах молнии в опору, в трос и в фазные провода необходимо определить изменение во времени напряжений, возникающих на гирлянде изоляторов в указанных выше случаях, а затем сопоставить их с ВСХ этой гирлянды.

Расчетные схемы замещения для определения напряжений на гирляндах изоляторов при ударе молнии в опору, в трос и в фазный провод показаны на рис. 1–3. На этих схемах замещения использованы следующие обозначения: $R_{оп}$ – импульсное сопротивление заземления опоры; $L_{оп,тр}$, $L_{оп,пр}$ – индуктивности участков опоры до точки подвеса троса и провода, соответственно; $aM_{тр}(t)$ – индуктированное напряжение магнитным полем канала молнии на тросе; u_{Σ} – суммарное индуктированное напряжение магнитным и электрическим полями канала молнии; u_p – рабочее напряжение; R_r – сопротивление утечки гирлянды изоляторов; R , L , C – матрицы погонных активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей фазных проводов и тросов; $l_{пр}$ – длина пролета.

В схемах замещения на рис. 1–2 провода и тросы ВЛ в каждом пролете представлены как многопроводные линии с распределенными параметрами длиной $l_{пр}$. Такое представление позволяет учесть отраженные волны напряжения от соседних опор, которые снижают напряжение на гирляндах изоляторов пораженной опоры, а также электромагнитную связь фазных проводов с тросами.

В схеме замещения для случая удара молнии в опору (рис. 1) учитываются также индуктированные составляющие напряжения, так как они в значительной степени влияют на вероятность обратного перекрытия линейной изоляции. При ударе молнии в трос в середине пролета индуктированными составляющими можно пренебречь, так как в этом случае канал молнии достаточно удален от опоры.

Так как параметры тока молнии являются случайными величинами, то и напряжения, возникающие на гирляндах изоляторов, являются случайными. Поэтому для определения вероятностей перекрытия изоляции при ударах молнии в опору, в трос и в фазные провода можно провести серию статистических расчетов по методу Монте-Карло. Для этого нужно сгенерировать случайные значения амплитуд и крутизны тока молнии, распределенные по логнормальному закону с заданными среднестатистически-

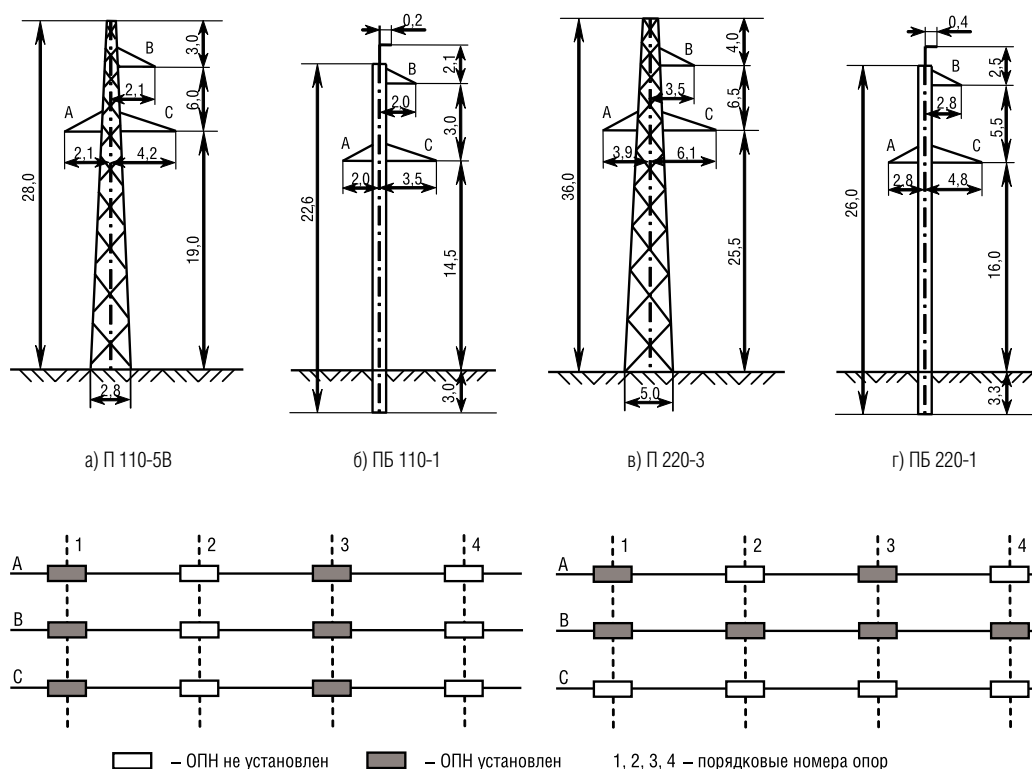


Рис. 4. Эскизы стальных (а,в) и железобетонных (б,г) опор ВЛ 110 и 220 кВ с одним тросом

Рис. 5. Варианты расстановки подвесных ОПН на воздушной линии электропередачи

ми параметрами [4, 5] и для этих значений с помощью схем замещения (рис. 1–3) провести серию расчетов напряжений, возникающих на гирляндах изоляторов. После проведения статистических расчетов вероятность перекрытия изоляции можно определить как отношение числа случаев, в которых изоляция перекрылась к общему числу проведенных расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЧИСЛА ГРОВОВЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ ВЛ С ПОДВЕСНЫМИ ОПН

С помощью схем замещения (рис. 1–2) были проведены расчеты числа грозовых отключений для ВЛ 110 и 220 кВ на металлических и железобетонных опорах с одним тросом, эскизы которых показаны на рис. 4. Расчеты проводились при различных значениях импульсного сопротивления заземления в диапазоне от 5 до 100 Ом. Рассматривались случаи ВЛ без установки подвесных ОПН, с установкой подвесных ОПН на всех фазах каждой второй опоры (рис. 5а) и с установкой подвесных ОПН не во всех фазах — на одной опоре в верхней и в одной нижней фазах, на следующей опоре только в верхней фазе (рис. 5б). Исходные данные, используемые при расчетах, сведены в табл. 1. Результаты приведены на рис. 6 и 7. Следует отметить, что полученные результаты соответствуют случаю установки подвесных ОПН без искрового промежутка.

Анализируя полученные результаты расчета числа грозовых отключений ВЛ с подвесными ОПН можно сделать следующие выводы. Установка ОПН на всех фазах каждой второй

опоры (рис. 5а) позволяет снизить число грозовых отключений ВЛ 110 кВ в 1,3–1,9 раза, ВЛ 220 кВ — в 1,7–2,2 раза при значениях сопротивления заземления от 5 до 100 Ом. Неполнофазная установка ОПН с защитой верхней и нижней фаз (рис. 5б) позволяет снизить число грозовых отключений ВЛ 110 кВ в 1,5–2,1 раза, ВЛ 220 кВ — в 2–2,7 раза при значениях сопротивления заземления от 5 до 100 Ом.

Следовательно, с точки зрения числа грозовых отключений вариант неполнофазной установки ОПН с защитой верхней и нижней фаз более эффективен. Объясняется это тем, что именно на изоляции верхней фазы возникают наибольшие перенапряжения, и большая часть обратных перекрытий происходит именно на верхний провод.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОНАГРУЗОК НА ОПН И ЧИСЛА ЛЕТ ЕГО БЕЗАВАРИЙНОЙ РАБОТЫ

При грозовом поражении ВЛ с подвесными ОПН определенная часть тока молнии (в зависимости от места удара) протекает через ОПН, в результате чего в нем выделяется тепловая

Таблица 1. Исходные данные для расчета числа грозовых отключений

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	Длина пролета ВЛ, м	Длина гирлянды изоляторов, м	Вольт-амперная характеристика ОПН	
			Импульсный ток 8/20 мкс с амплитудой, А	Остающееся напряжение, кВ
110	200	1,02	3000	297
			5000	314
			10000	332
220	200	1,78	3000	532
			5000	562
			10000	594

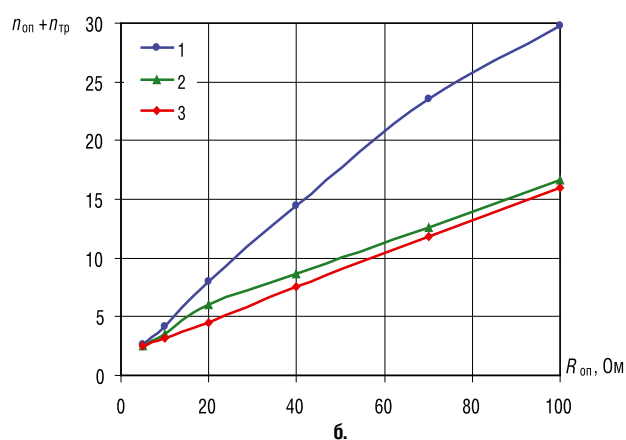
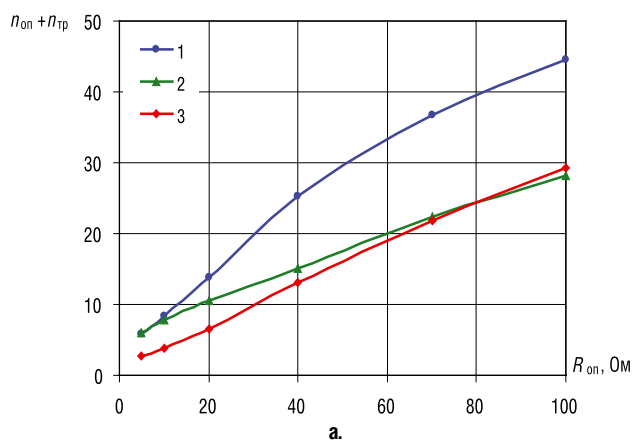


Рис. 6. Расчетные удельные числа грозовых отключений ВЛ 110 кВ с одним тросом: а – на опорах П 110-5Б; б – на опорах П 110-1; 1 – ОПН не установлены; 2 – ОПН установлены во всех фазах каждой второй опоры; 3 – ОПН установлены на одной опоре в верхней и в одной нижней фазах, на следующей – только в верхней фазе

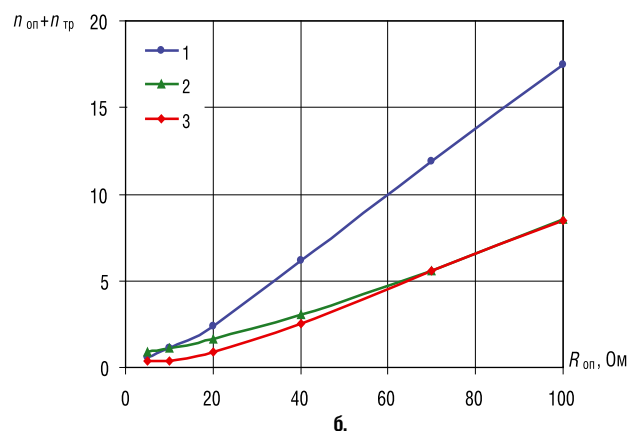
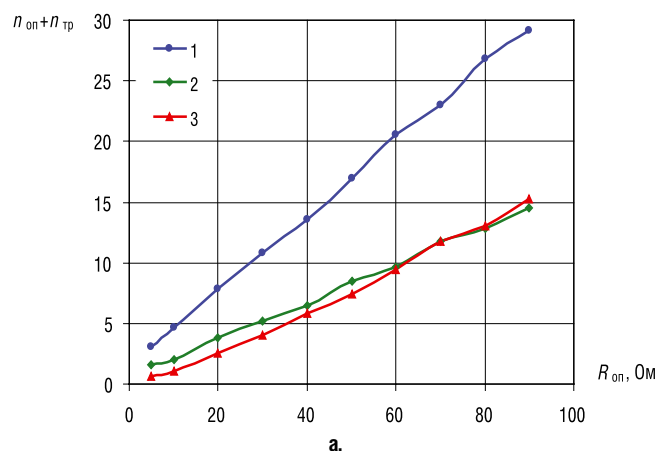


Рис. 7. Расчетные удельные числа грозовых отключений ВЛ 220 кВ с одним тросом: а – на опорах П 220-3; б – на опорах ПБ 220-1; 1 – ОПН не установлены; 2 – ОПН установлены во всех фазах каждой второй опоры; 3 – ОПН установлены на одной опоре в верхней и в одной нижней фазах, на следующей – только в верхней фазе

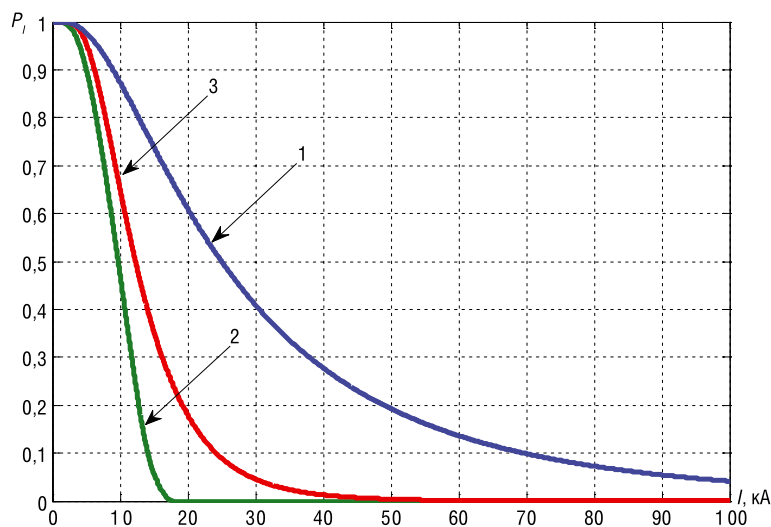


Рис. 8. Распределение амплитуд токов молнии: 1 – для первого компонента при ударах в опору (по данным [4]); 2 – для первого компонента при прорывах молнии на фазные провода (по данным [7]); 3 – для последующих компонентов (по данным [5])

энергия $W_{\text{опн}}$. Если значение этой энергии превысит энергоемкость аппарата $W_{\text{доп}}$, то произойдет его термическое разрушение. В связи с этим необходимо оценить надежность работы подвесных ОПН на ВЛ. Основным показателем надежности работы подвесного ОПН на ВЛ – число лет его безаварийной работы, которое рассчитывается по формуле:

$$L = \frac{1}{N_{\text{вл.опн}} P_w(W_{\text{опн}} > W_{\text{доп}})}, \quad (6)$$

где $P_w(W_{\text{опн}} > W_{\text{доп}})$ – вероятность превышения рассеиваемой в ОПН энергией значения его энергоемкости $W_{\text{доп}}$; $N_{\text{вл.опн}}$ – число прямых ударов молнии в участок ВЛ с установленными подвесными ОПН в год.

При определении энергий, рассеиваемых в ОПН, необходимо учитывать многокомпонентный характер тока молнии, так как каждый компонент вносит свой вклад в нагрев ограничителя. Учитывая тот факт, что интервалы времени между повторными разрядами молнии не

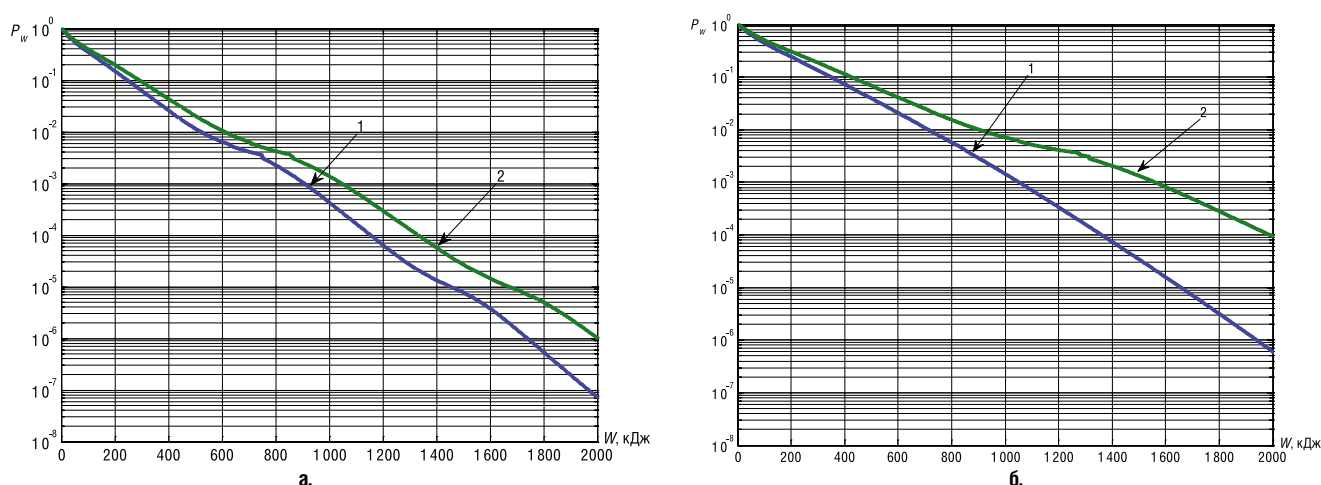


Рис. 9. Расчетные распределения энергий, рассеиваемых в ОПН, при прорыве молнии на фазные провода:

а – ВЛ 110 кВ; б – ВЛ 220 кВ; 1 – ОПН установлены на каждой опоре; 2 – ОПН установлены на каждой второй опоре

превышают несколько сотен микросекунд [6], то процесс нагрева ОПН можно считать адиабатическим и результирующее значение энергии, рассеянной в ограничителе, определяется суммой энергий от каждого компонента.

Энергия, рассеиваемая в ОПН от отдельного компонента, определяется как интеграл мгновенной активной мощности:

$$W_{\text{опн}} = \int_0^{\tau} u_{\text{опн}}(t) i_{\text{опн}}(t) dt, \quad (7)$$

где $u_{\text{опн}}(t)$ – мгновенное значение напряжения на ОПН; $i_{\text{опн}}(t)$ – мгновенное значение тока через ОПН; τ – момент перехода ОПН в непроводящее состояние.

Интегральная функция распределения энергий, рассеиваемых в ОПН при ударах молнии в фазный провод, в опору и в трос в середине пролета рассчитывается по формуле:

$$P_w(W_{\text{опн}} > W) = \Delta_{\text{пр}} P_w^{\text{пр}}(W_{\text{опн}} > W) + \Delta_{\text{оп}} P_w^{\text{оп}}(W_{\text{опн}} > W) + \Delta_{\text{тр}} P_w^{\text{тр}}(W_{\text{опн}} > W) \quad (8)$$

где $\Delta_{\text{пр}}$, $\Delta_{\text{оп}}$ и $\Delta_{\text{тр}}$ – вероятности удара молнии в провод, в опору и в трос в середине пролета; $P_w^{\text{пр}}$, $P_w^{\text{оп}}$ и $P_w^{\text{тр}}$ – функции распределения энергий, рассеиваемых в ОПН от всех компонентов при ударе молнии в провод, в опору и в трос.

Функция распределения суммарной энергии, рассеиваемой в ОПН, например, при ударе в провод $P_w^{\text{пр}}$, рассчитывается по формуле:

$$P_w^{\text{пр}}(W_{\text{опн}} > W) = \sum_{i=1}^{N_k} P_i P_{w1,i}^{\text{пр}}(W_{\text{опн}} > W) \quad (9)$$

где P_i – вероятность i компонентов в разряде молнии; $P_{w1,i}^{\text{пр}}$ – функции распределения вероятностей при воздействии i компонентов; N_k – максимальное число компонентов в разряде молнии.

Функция распределения вероятности энергий, поглощаемых ОПН при воздействии i компонентов $P_{w1,i}^{\text{пр}}$, определяется следующим образом:

1) с помощью схем замещения (рис. 1–3) в серии статистических расчетов по методу Монте-Карло определяются значения энергий, рассеиваемых в наиболее нагруженном ОПН, при воздействии первого и последующего компонента разряда молнии;

2) по полученным значениям энергий, рассеиваемых в ОПН, рассчитываются функции распределения энергий при воздействии первого и последующего компонента, а также функции плотности распределения $P_{w1}^{\text{пр}}$ и $P_{w2}^{\text{пр}}$;

3) функция плотности распределения суммарной энергии от i компонентов разряда молнии рассчитывается с помощью интеграла свертки:

$$p_{w1,2}^{\text{пр}}(W) = \int_0^W p_{w1}^{\text{пр}}(\omega) p_{w2}^{\text{пр}}(W - \omega) d\omega, \\ \vdots$$

$$p_{w1,i}^{\text{пр}}(W) = \int_0^W p_{w1,i-1}^{\text{пр}}(\omega) p_{wi}^{\text{пр}}(W - \omega) d\omega;$$

4) для полученных функций плотности распределения определяются функции распределения энергий, рассеиваемых в ОПН:

$$P_{w1,i}^{\text{пр}}(W_{\text{опн}} > W) = \int_W^\infty p_{w1,i}^{\text{пр}}(\omega) d\omega$$

В случаях удара молнии в опору или в трос процедура определения функций распределения энергий при воздействии i компонентов $P_{w1,i}^{\text{оп}}$, $P_{w1,i}^{\text{тр}}$ полностью аналогична.

При расчете энергий, рассеиваемых в ОПН при ударе молнии в провод, необходимо учитывать тот факт, что для прорвавшихся молний распределение амплитуд токов первого компо-

Таблица 2. Распределение вероятности превышения числа компонент в разряде молнии

Число компонентов в разряде молнии, более	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Число разрядов молнии с указанным числом компонентов, %	100	55	42	33	25	18	14	10	8

нента меняет свой характер. Как показывают расчеты по электрогеометрическому методу и методам, основанным на расчете электрического поля лидера молнии, вероятность прорыва молний с большими амплитудами очень мала [7, 8]. Это обстоятельство благоприятно влияет на условия надежной работы ОПН, так как именно при ударе в фазный провод наибольшая часть тока молнии протекает через ограничитель. Для последующих же компонентов тока молнии, наиболее вероятно, что распределение амплитуд токов не изменяется, так как в большинстве случаев последующие разряды происходят по тому же каналу, что и главный разряд [6].

В качестве примера на рис. 8 приведены распределения амплитуд токов молнии для первого компонента при ударах в опору и прорывах на фазные провода, а также для последующих компонентов. Распределение амплитуд токов при прорывах молнии на фазные провода построено с использованием результатов, полученных в [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГОНАГРУЗОК НА ОПН И ЧИСЛА ЛЕТ ЕГО БЕЗАВАРИЙНОЙ РАБОТЫ

Расчеты энергий, рассеиваемых в ОПН, проводились для случаев удара молнии в провод и в опору ВЛ 110 и 220 кВ с молниезащитными тросами по соответствующим схемам замещения (рис. 1 и 3). Расчеты были проведены для случаев расстановки ОПН на каждой и на каждой второй опорах. Во всех случаях определялась рассеиваемая энергия в наиболее нагруженном ограничителе.

На рис. 9 приведены распределения выделяемых в ОПН энергий только при ударах в провод, так как при сопротивлениях заземления $R_{оп} \leq 100$ Ом распределения при ударах в опору имеют второстепенное значение при выборе энергоемкости подвесного ОПН. Все расчеты энергий проводились при значении сопротивления заземления $R_{оп} = 50$ Ом.

Данные о числе компонентов в разряде отрицательной молнии, используемые для определения функций распределения суммарных энергий при воздействии многокомпонентной молнии, приведены в таблице 2 [4].

При полученных распределениях энергий, рассеиваемых в ОПН, по (6) можно оценить число лет безаварийной работы ограничителя на ВЛ 110 и 220 кВ с молниезащитными тросами. В табл. 3 приведены расчетные числа лет безаварийной работы ОПН на 100 км линии и 100 грозовых ча-

сов при различных энергоемкостях ограничителей и вариантах их расстановки на ВЛ.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы: энергетические нагрузки на ОПН зависят от числа ограничителей на линии. Чем меньше ограничителей, тем большая энергия рассеивается в одном аппарате. Для всех схем расстановки ограничителей, проанализированных авторами, оказывается приемлемым выбор ограничителей со вторым классом пропускной способности.

К расчетным оценкам энергетических воздействий на ОПН следует относиться с определенной долей осторожности, так как подход, основанный на совместном учете энергий от всех компонентов молнии, по всей видимости, является излишне консервативным. Необходимо учитывать корреляцию между амплитудой тока первого компонента разряда и токами последующих компонентов. В связи с отсутствием экспериментальных данных такого рода эту задачу можно решить, нормируя вероятностные распределения на полный заряд облака, установив корреляционную связь между этим разрядом и амплитудой тока первого компонента. В настоящее время на кафедре ТЭВН МЭИ ведутся работы в этой области.

ВЫВОДЫ

1. При установке подвесных ОПН на всех опорах и фазах ВЛ можно практически полностью исключить грозовые отключения линии. При этом для выбора ОПН следует проводить только расчеты энергетических воздействий для определения необходимой пропускной способности аппарата.

2. Неполнофазная установка ОПН (число ОПН на линии в два раза меньше, чем при защите всех опор и фаз) позволяет уменьшить число грозовых отключений в 1,5–2,7 раза. Вариант с защитой верхней фазы на каждой опоре оказывается более эффективным при сопротивлениях меньших 60–80 Ом. При больших сопротивлениях более эффективным является вариант полнофазной защиты с чередованием опор.

3. Как следует из проведенных расчетных оценок энергонагрузок на ОПН, установленных на ВЛ с тросами, приемлемое число лет безаварийной работы ОПН удастся обеспечить выбором аппаратов второго класса пропускной способности. При отсутствии на ВЛ тросовой защиты расчетные энергетические воздействия на ОПН оказываются недопустимо большими по причине частых ударов молнии в фазные провода.

4. Для выявления возможности эксплуатации ВЛ со снятыми грозозащитными тросами необходимо дальнейшее совершенствование методов расчета энергетических воздействий на подвесные ОПН.

Таблица 3. Число лет безаварийной работы ОПН на ВЛ 110 и 220 кВ.

а – ОПН установлены на каждой опоре;
б – ОПН установлены на каждой второй опоре

$W_{доп}, \text{кДж}$		550		870		920		1350	
Вариант установки	$U_{ном}, \text{кВ}$	а	б	а	б	а	б	а	б
		110	266	156	1613	753	-	-	-
	220	-	-	-	-	437	118	9932	4370

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещагин И.П., Матвеев Д.А., Поблагуев И.А. Методика расчета показателей эффективности применения подвесных ОПН для повышения грозоупорности воздушных линий электропередачи // Электротехника. 2005. № 10. С. 31–39.

2. Гайворонский А.С. Линейные разрядники – радикальное средство грозозащиты ВЛ // Новости Электротехники, № 2, 2006.

3. Дмитриев М.В. Оценка числа отключений ВЛ с учетом троса и без него // Новости Электротехники. 2008. № 6.

4. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 355 стр.

5. Parameters of Lightning Strokes: A Review // Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No.1, January 2005

6. Rakov V.A., Uman M.A., Lightning: Physics and Effects, Cambridge University Press, 2003.

7. J. He, Y. Tu, R. Zeng, J.B. Lee, S.H. Chang and Z. Guan, "Numerical Analysis Model for Shielding Failure of Transmission Line Under Lightning Stroke", IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pt. 1, pp. 815-821, Apr. 2005.

8. B. Vahidi, M. Yahyaabadi, M.B. Tavakoli, S.M. Anadi, "Leader Progression Model for Shielding Failure Computation by Using the Charge Simulation Method", IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 4, pp. 2201–2206, Oct. 2008.

КОММЕНТАРИИ ЭКСПЕРТОВ

О ПРИМЕНЕНИИ ОПН,
УСТАНОВЛИВАЕМЫХ НА ОПОРАХ ВЛ ВН

КАДОМСКАЯ К.П. ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»

Статья Д.А. Матвеева и М.З. Гилязова посвящена актуальному вопросу – повышению грозоупорности ВЛ 110–220 кВ с помощью ОПН, устанавливаемых на опорах ВЛ.

Вопросы, связанные с повышением грозоупорности ВЛ ВН с помощью установки ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН) на опорах ВЛ, рассматриваются достаточно давно. Толчком к их рассмотрению в электроэнергетике России послужил доклад, опубликованный на сессии СИГРЭ в августе – сентябре 1994 года [1]. Из этого доклада следует, что к 1992 году в электрических сетях Японии было установлено 29580 аппаратов: 840 аппаратов на ВЛ 22–33 кВ (2,84 %), 26495 аппаратов на ВЛ 66–77 кВ (89,57 %), 1879 на ВЛ 110–154 кВ (6,35 %) и 366 – на ВЛ 187–500 кВ (1,24 %). Как правило, опоры всех ВЛ – двухцепные, и аппараты установлены либо на трех фазах одной цепи (97,07 %), либо на всех шести фазах двух цепей (2,58 %), либо на двух фазах одной цепи (0,35 %), либо на одной из шести фаз (всего два аппарата). Статистический анализ эксплуатации ВЛ, оснащенных подвесными ОПН, показал весьма ощутимое повышение надежности

эксплуатации ВЛ. При установке ОПН на каждой фазе двухцепных повреждений не наблюдалось, одноцепные повреждения наблюдались примерно в 60 % случаев и в 40 % случаев повреждения линейной изоляции ВЛ отсутствовали. На ВЛ, не оснащенных подвесными ОПН, в 60 % случаев, наблюдались двухцепные повреждения, в остальных случаях – одноцепные повреждения. Актуальность такого способа повышения грозоупорности ВЛ была подтверждена решением 33 комитета СИГРЭ в 1999 году [2]. В упомянутых источниках рассматривались два способа присоединения ОПН к проводу: через искровой промежуток (ИП) и наглухо. Результаты исследования эффективности этих двух способов достаточно подробно отражены в публикациях кафедры Техники и электрофизики высоких напряжений (ТиЭВН) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) [3, 4]. Исследования показали, что подключение ОПН через ИП целесообразно в ВЛ 500 кВ и выше для предотвращения «срабатывания» ОПН при энергоемких коммутационных перенапряжениях. В упомянутых и других публикациях сотрудников НГТУ, рассматривающих различные аспекты

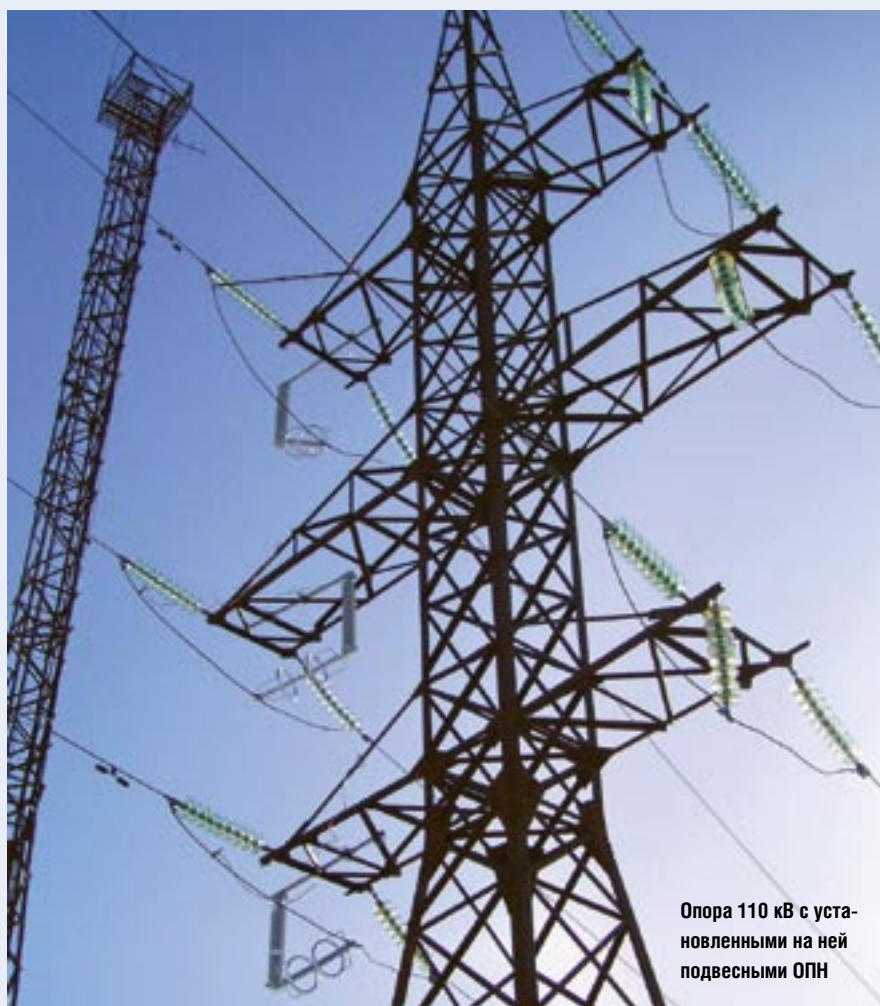
эксплуатации подвесных ОПН, устанавливаемых на двухцепных ВЛ 110–220 кВ, сформулированы следующие основные выводы:

■ в систему проектирования грозозащиты двухцепных ВЛ с помощью подвесных ОПН следует отнести:

- выбор опор по трассе ВЛ, на которых следует устанавливать ОПН,
- выбор фаз на опоре, на которых целесообразна установка ОПН,
- определение характеристик ОПН, в том числе и требуемой их энергоемкости;

■ система грозозащиты двухцепных ВЛ с помощью подвесных ОПН зависит от целого ряда факторов, к которым прежде всего следует отнести уровень грозопоражаемости в районе трассы ВЛ, удельную проводимость грунта, определяющую в большой степени сопротивление заземления опор, конструкцию ВЛ, требуемые характеристики надежности эксплуатации ВЛ.

Упомянутые выше публикации и публикации последнего времени, например [4–6], в том числе и обсуждаемая статья Д.А. Матвеева и М.З. Гилязова, посвященные методам расчета требуемых характеристик ОПН, устанавливаемых на опорах, основаны на весьма схожих математических моделях, ис-



Опора 110 кВ с установленными на ней подвесными ОПН

пользование которых приводит к близким результатам. Методики, изложенные в статье Д. А. Матвеева и М. З. Гилязова, без сомнения, могут дополнить соответствующие разработки упомянутых выше авторов. Нельзя лишь согласиться с утверждением авторов о том, что «в России установка подвесных ОПН до сих пор не нашла широкого применения (имеется лишь небольшой экспериментальный опыт)». Нельзя не отметить, что достаточно крупный в настоящее время проект в России по оснащению ВЛ 110 кВ ОПН осуществлен в ОАО «Тюменьэнерго» [7]. Общая протяженность линий с применением ОПН в этой энергосистеме составляет около 120 км, количество установленных аппаратов производства ЗАО «Феникс-88» – 1596 единиц 2-ой группы по энергоемкости и 4 аппарата 4-ой группы по энергоемкости на воздушном переходе через реку Яган. На фотографии показана опора двухцепной ВЛ 110 кВ с установлен-

ными на ней ОПН, оснащенных искровыми промежутками.

Одной из проблем эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ, находящихся на территориях Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов, является низкая грозоупорность ВЛ, связанная с высоким удельным сопротивлением грунтов в этих регионах. По этой причине в периоды грозовой деятельности имели место достаточно частые отключения ВЛ, вызванные обратными перекрытиями изоляции линий электропередачи из-за высокого сопротивления в цепи стекания тока молнии в землю. По этой же причине ОПН в ОАО «Тюменьэнерго» оснащены ИП. Имеется также положительный опыт эксплуатации ОПН, установленных в 2004 г. на всех фазах 20 опор ВЛ 400 кВ в МЭС Северо-Запада. Проектирование подвесных ОПН в настоящее время активно продолжается в том числе и силами тех организаций,

которые имеют производственную базу для их изготовления (например, ЗАО «Феникс-88»-Новосибирск, «Позитрон»-Санкт-Петербург, ООО «Полимер-аппарат»-Санкт-Петербург). Очевидно, что работы этих организаций не исключают развитие методических работ, связанных с определением характеристик подвесных ОПН, рациональных мест их установки на ВЛ и оценки надежности эксплуатации ВЛ, оснащенных этими защитными аппаратами, среди которых следует особо отметить работы СибНИИЭ (Новосибирск) [8]. Определенный вклад в решение этих задач вносят соответствующие методики, изложенные в статье Д. А. Матвеева и М. З. Гилязова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kawamura T., Nagano M., Ichihara M., Ishikawa K., Mizoguchi S., Imakoma T., Shimomura T. Development of metal oxide transmission line arrester and its effectiveness. – CIGRE, 1994 Session. – Rep.33.201.
2. Application of metal oxide surge arresters to overhead lines. Working Group 33.11. Task Force 03. A.SCHEI, Convenor of WG 33.11.-Electra (SIGRE). –1999. – № 186.
3. Кадомская К.П., Рейхердт А.А. Анализ условий эксплуатации нелинейных ограничителей перенапряжений, устанавливаемых на опорах воздушных линий высокого напряжения// Электричество, 2000, № 3, С. 2–6.
4. Рейхердт А.А. Анализ воздействий коммутационных перенапряжений на подвесные защитные аппараты, устанавливаемые на опорах воздушных линий // Сб.научн.тр. НГТУ, 1999, № 3 (16), С. 117–122.
5. Зубков А.С. Защитные аппараты типа ОПН как средство повышения грозоупорности двухцепных ВЛ. Новости электротехники, № 4 (34), 2005, С. 2–5.
6. Дмитриев М.В. Воздушные линии 110–220 кВ. Защита изоляции от грозовых перенапряжений. Новости электротехники, № 6 (54), 2008, С.
7. Данилов Г.А., Зубков А.С., Боровицкий А.Г., Лошаков Ю.Е. Подвесные ОПН как средство повышения надежности работы воздушных линий электропередачи (опыт применения). – ЭнергоInfo, № 11 (23), Ноябрь 2008. – С. 55–61.
8. Гайворонский А.С. Линейные разрядники – радикальное средство грозозащиты ВЛ. Новости электротехники, № 2 (38), 2006.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗРЯДНИКОВ УЖЕ СУЩЕСТВУЕТ

ГАЙВОРОНСКИЙ А.С. Заместитель директора – начальник отдела инжиниринга филиала ОАО «НТЦ электроэнергетики» – СибНИИЭ

В статье Гилязова М.З. и Матвеева Д.А. основное внимание уделяется методическим аспектам применения линейных разрядников (ЛР), связанным с выбором схемы расстановки ЛР по линии и пропускной способности ЛР. Авторы справедливо отмечают, что на сегодняшний день «полное отсутствие методических и нормативных документов, регламентирующих выбор подвесных ОПН», – главное препятствие на пути их внедрения. С этой точки зрения, публикация статьи весьма своевременна, и предлагаемые в ней методы оценки эффективности применения ЛР заслуживают самого пристального внимания.

Хотелось бы остановиться на некоторых положениях статьи, которые представляются нам наиболее важными и заслуживают обсуждения.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЛР

Этот вопрос имеет принципиальное значение, поскольку в зависимости от области применения (назначения) ЛР существенно меняются требования к разрядникам и схеме их расстановки на линии. В отечественной практике области применения ЛР, где они наиболее востребованы на сегодняшний день, включают защиту ВЛ в особо гололедных районах, эксплуатируемых без тросов, и защиту двухцепных ВЛ в районах с плохо проводящими грунтами при больших сопротивлениях заземления опор. К сожалению, именно эти наиболее актуальные применения ЛР не нашли отражения в статье.

РОССИЙСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛР

В статье справедливо отмечается, что «в России установка подвесных ОПН до сих пор не нашла широкого применения». Тем не менее, отечественный опыт применения ЛР уже существует, и он выходит за рамки «небольшого экспериментального опыта», на который ссылаются авто-

ры статьи. В 2006–2008 гг. филиалом ОАО «НТЦ электроэнергетики» – «СибНИИЭ» был выполнен ряд проектов по повышению грозоупорности ВЛ с применением линейных разрядников, в том числе: проект грозозащиты большого перехода ВЛ 500 кВ «СуГРЭС – Ильково» через реку Обь с применением линейных ОПН без установки грозозащитных тросов; проект грозозащиты ВЛ 500 кВ «Центральная-Дагомыс» с применением линейных ОПН (МЭС Юга, особо гололедный район, линия эксплуатируется без троса, защищаемый участок 100 км), а также проекты грозозащиты двухцепных ВЛ 110 кВ в районах с плохо проводящими грунтами с применением ЛР с внешним искровым промежутком (Сургутнефтегаз, Тюменьэнерго, общая протяженность ВЛ более 150 км). За исключением грозозащиты большого перехода все остальные проекты уже реализованы, и имеется первый положительный опыт применения линейных разрядников (ОПН) на указанных линиях.

СХЕМЫ РАССТАНОВКИ ЛР НА ЛИНИИ

Выбор схемы защиты предусматривает определение мест установки ЛР на линии (на опорах и на фазах), при которых обеспечивается требуемая надежность защиты. Общий подход к выбору схемы защиты должен основываться на технико-экономическом сравнении различных вариантов. В конечном счете выбор той или иной схемы защиты представляет собой компромисс между надежностью защиты, с одной стороны, и затратами на ее реализацию, с другой стороны.

Показатель надежности – допустимое число грозовых отключений ВЛ на 100 км и на один год эксплуатации. В действующих нормативных документах этот показатель строго не нормируется, и при выборе средств грозозащиты ВЛ предлагается ориентироваться на достигну-

тые средние показатели по удельному числу грозовых отключений для линий данного класса напряжения. Например, для ВЛ 220 кВ это означает 0,03–1,2 отключений на 100 км в год. На практике требуемая надежность защиты в каждом конкретном случае устанавливается индивидуально в зависимости от ответственности линии и других сопутствующих факторов, являющихся прерогативой заказчика.

В обсуждаемой статье рассматриваются схемы частичной защиты с применением подвесных ОПН на одноцепных ВЛ 110, 220 кВ. Как уже говорилось, это не вполне те объекты, которые хотелось бы видеть, поскольку наиболее проблемными являются двухцепные ВЛ 110, 220 кВ при больших сопротивлениях заземления опор либо ВЛ без тросов. По этой причине предлагаемые авторами схемы защиты воспринимаются несколько академично и представляют разве что методический интерес. Сама постановка вопроса о частичной защите (установка ОПН на каждой второй опоре и неполнофазная установка), без сомнения, правомерна, поскольку это позволяет существенно сократить затраты на установку ОПН. Однако при этом нельзя забывать расхожее правило – «экономика должна быть экономной». С этой точки зрения, предлагаемые авторами схемы частичной защиты нельзя признать эффективными. В разовом исчислении их эффект составляет двукратное снижение числа грозовых отключений, то есть вполне ощутим. Однако в абсолютном выражении число грозовых отключений составляет для разных схем от 10 до 30 на 100 км в год, что значительно превышает всякие разумные нормы. По нашему мнению, данные схемы частичной защиты являют собой пример «перезакономии» – несмотря на экономию, деньги затрачиваются большие, а нужный эффект не достигается.

феникс88
с октября 1988 года

Энергетика и Феникс 88: 20 лет вместе

**ОПН для надежности подстанций
и воздушных линий**

Первая
русская
компания, освоившая
серийное производство
ОПН и изоляторов
с безопасной полимерной
изоляция.

www.fenix88.ru

CERTIFICATE TUV NORD
Management system in acc.
to EN ISO 9001:2008

Joint Stock Company «FENIX 88»
Kirovskiy rayon, St. 103
Kirovskiy rayon, Russia



ВЫБОР УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ЛР

На сегодня это наиболее важный вопрос для применения ЛР и наименее методически проработанный. Поэтому предлагаемый авторами статистический подход к выбору удельной энергии ОПН имеет не только научное, но и большое практическое значение. Ряд положений этого подхода, которые мы хотели бы обсудить, представляются нам спорными. Прежде всего, это касается определяющей характеристики разряда молнии, от которой зависит энергия, выделяемая в ОПН. По нашему мнению, такой характеристикой является заряд вспышки молнии, переносимый импульсами тока первого и последующих ударов. Почему именно заряд, а не ток, как предлагают авторы статьи? По двум причинам. Во-первых, энергия, выделяемая в ОПН, как это следует из выражения (7) в статье, определяется интегралом тока, то есть зарядом (остающееся напряжение на ОПН в первом приближении – константа). Во-вторых, и это главное, для нахождения функции распределения энергии, выделяемой в ОПН, нам необходимо знать закон распределения исходной случайной величины: амплитуды и длительности импульса тока или же заряда. Законы распределения импульсного заряда для первого и последующих компонент вспышки молнии известны (данные Бергера). Законы распределения амплитуд токов молнии также известны, а вот статистические данные по длительности импульсов тока молнии в настоящее время отсутствуют. Таким образом, при расчетах энергии в ОПН в зависимости от амплитуды тока молнии возникает очевидная неопределенность: какую длительность импульса тока принимать в расчетах? Авторы статьи обходят этот вопрос стороной.

Другое положение, заслуживающее обсуждения, касается необходимости более полного учета различных факторов, в том числе случайных, влияющих на энер-

гию, выделяемую в ОПН. К ним следует отнести длину пролета, место удара молнии в пролете, сопротивление заземления опор и др. Например, согласно нашим расчетам, энергия, выделяемая в ОПН при защите ВЛ без тросов, может возрастать в 2,5 раза при увеличении длины пролета от 200 до 1000 м. Энергия, выделяемая в ОПН при защите ВЛ 110, 200 кВ от обратных перекрытий при ударах молнии в трос, возрастает в 1,6 раза при увеличении сопротивления заземления опоры от 50 до 100 Ом.

И последнее, на что хотелось бы обратить внимание. При определении лет безаварийной эксплуатации ОПН авторы не учитывают удары молнии в опоры и в трос на том основании, что «при сопротивлениях заземления $R_{оп} \leq 100$ Ом распределения при ударах в опору имеют второстепенное значение при выборе энергоемкости подвешенного ОПН». По нашему мнению, это ошибочное заключение. Действительно, энергия, выделяемая в ОПН при ударах в трос (опору), существенно меньше, нежели при ударах в провод. Однако и количества этих ударов существенно отличаются, ударов в трос примерно в 100 раз больше, чем ударов в провод. Поэтому поток отказов, который пропорционален количеству воздействий, может быть сопоставим для случаев ударов в провод и в трос. По нашим оценкам, имеет место именно такое соотношение.

В заключение еще раз отметим большое значение методических аспектов применения линейных разрядников (ОПН), которые рассмотрены в статье, и оригинальность методов оценки эффективности применения линейных ОПН, предложенных авторами. Надеемся, что данный отзыв будет воспринят с пониманием. Выработка обоснованных подходов к выполнению грозозащиты ВЛ с применением линейных разрядников – задача актуальная и, как выясняется, не совсем тривиальная, поэтому решать ее нужно совместными усилиями.