

# Оценка энергии, выделенной в нелинейных ограничителях перенапряжений при воздействии атмосферных перенапряжений

КОЛЕЧИЦКИЙ Е.С.

Предложен новый способ оценки энергии, выделенной в ограничителях перенапряжений (ОПН), при воздействии волн перенапряжений, набегающих на подстанцию (ПС) с воздушных линий. Способ основан на оценке энергии падающего импульса. Так как энергия, которую несет импульс тока, конечна, то и выделенная в ОПН энергия также конечна и не может быть больше энергии импульса тока. Выводится формула для определения полной энергии, которую несет импульс тока. В справедливости формулы можно убедиться, если рассмотреть задачу о падении волны на нагрузку, сопротивление которой равно волновому сопротивлению линии. Для этой же цели можно также использовать программу ЕМТР-АТР. Определив полную энергию падающей волны, можно найти верхний предел энергии, которую необходимо затратить, чтобы ограничить перенапряжения. В число ограничений в этой задаче входят: ограничение амплитуды падающей волны напряжения до уровня электрической прочности изоляции линии; параметры ОПН, задаваемые нормативными документами, и требуемый уровень ограничения перенапряжений по ГОСТ 1516.3—96. Из результатов расчетов следует, что для классов напряжения 220 — 750 кВ полная энергия, выделенная в ОПН, составляет примерно 84 % энергии падающей волны. Этот вывод позволяет утверждать, что в задачах по защите от грозových перенапряжений ОПН полностью выполняют свои функции без перегрузок. Показано, что ОПН, установленные на воздушных линиях для снижения числа грозových отключений, не перегружаются в случаях, когда они установлены на промежуточных опорах. Приведены рекомендации для учета отходящих от ПС линий, которые можно использовать для оптимизации числа ОПН на ПС.

Ключевые слова: подстанции, линии электропередачи, ограничение перенапряжений, импульс тока, энергия

Рассмотрим способ оценки энергии, выделяемой в ОПН, установленных на воздушных линиях (ВЛ) или на подстанциях (ПС), при падении волны перенапряжения с линии. Рассчитаем энергию, которую несет электрическая волна, распространяющаяся по однородной линии без потерь с волновым сопротивлением  $Z$ . Рассмотрим сначала коаксиальную линию. Вектор Пойнтинга в такой линии [1]:

$$\Pi = EH = \frac{tI}{\epsilon_0 \rho^2 r^2}.$$

Для определения передаваемой мощности достаточно умножить  $\Pi$  на значение элемента площади и проинтегрировать по сечению кабеля. В итоге

$$P = \frac{tI}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{r} = \frac{I}{2\pi\epsilon_0} CU \ln \frac{R}{r} = \frac{I}{2\pi\epsilon_0} \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{R}{r}} IZ \ln \frac{R}{r} = [I(t)]^2 Z, \quad (1)$$

где  $Z = 60 \ln(R/r)$  — волновое сопротивление кабеля.

Полная энергия импульса определяется интегрированием по времени:

$$W = Z \int_0^b [I(t)]^2 dt, \quad (2)$$

где  $I(t)$  — импульс тока;  $b$  — длительность импульса.

Очевидно, все приведенные формулы могут быть записаны и для линии без потерь (т.е. расположенной над бесконечно проводящей плоскостью). Для этого случая формула (2) сохраняется,

однако выражение для волнового сопротивления принимает следующий вид:

$$Z = 60 \ln(2H/r). \quad (3)$$

В справедливости формул (2) и (3) легко убедиться исходя из простейших соображений. Представим, что в конце линии включен резистор, сопротивление которого равно  $Z$ . В этом случае отражения волны не происходит и вся ее энергия, определенная формулой (2), выделяется на резисторе.

Выражение для полной энергии можно переписать в удобном для интегрирования виде, если обозначить форму волны тока как произведение его амплитуды  $I_0$  на безразмерную функцию  $f(t)$ , описывающую форму волны:

$$W = I_0^2 Z \int_0^b [f(t)]^2 dt. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет получить аналитические выражения для энергии импульсов различной формы:

Импульс с косоугольным фронтом  $I(t) = I_0(t/b)$

$$W_S = I_0^2 Z b / 3; \quad (5)$$

импульс в виде экспоненты  $(f(t) = \exp(-t/t))$  при  $b > t$

$$W_E = I_0^2 Z t / 2. \quad (6)$$

Правильность формул (4)–(6) была проверена при сравнении результатов расчетов по ним с расчетами по программе ЕМТР-АТР [2]: результаты совпадают.

Для того чтобы ограничить круг технических параметров задачи, введем несколько ограничений: амплитуда импульса напряжения равна импульсному пробивному напряжению гирлянды изоляторов по [3];

технические характеристики ОПН соответствуют стандарту [4] по допустимой выделенной энергии и остающимся напряжениям;

расчеты проводятся для параметров, соответствующих сетям с номинальным напряжением 220–750 кВ;

импульс тока, набегаящего с линии на ПС, имеет стандартную форму с параметрами 1/200 мкс (воздействия повторных компонент тока молнии, а также волны, возникающей после обратного перекрытия изоляции на защитном подходе в данном сообщении, не рассматриваются);

ПС моделируется емкостью 0,01 мкФ.

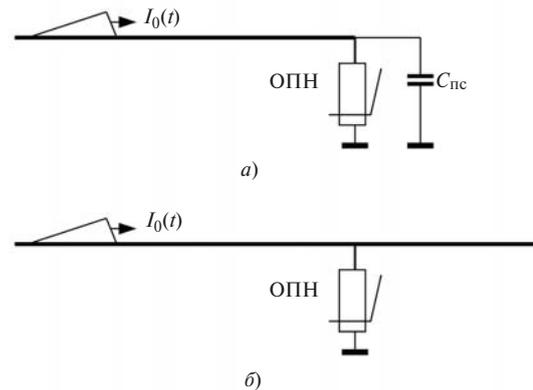
Исходные данные (пробивные напряжения гирлянды изоляторов, волновые сопротивления линии, амплитуды импульса тока, удельная энергия ОПН) для расчетов и результаты расчетов приведены в таблице. Электрическая схема показана на рисунке, *а*.

Необходимо пояснить, что волновое сопротивление линии вычисляется по (3), так как в данной задаче рассматривается режим линии и ОПН при воздействии импульса тока. На фронте волны «эквивалентная частота» равна  $f = t_{\phi} / 4 = 250$  кГц, а глубина скин-слоя меньше высоты подвеса провода.

Результаты, приведенные в таблице, показывают, что полная энергия падающей волны тока (определенная по (6)) примерно вдвое меньше, чем полная допустимая энергия по паспорту ОПН ( $W_{уд} U_{н.р}$ ). В свою очередь энергия, выделенная в ОПН, установленном на ПС (рисунок, *а*), не превышает полную энергию волны. Для всех классов напряжения, рассмотренных в таблице, имеет место приблизительное соотношение

$$W_{ОПН} \approx 0,84 W_S. \quad (7)$$

Это значит, что при воздействии грозových перенапряжений ОПН на ПС не могут быть «перегружены». В частности для ПС с простейшей схемой даже один ОПН обеспечивает защиту изоляции.



Безусловно, на большой территории ПС напряжение в отдельных точках может превышать остающееся на ОПН, заданное паспортными данными для отдельного ОПН. Однако ясно, что тепловая нагрузка (энергия, выделенная на ОПН) не будет превышать допустимую. Вместе с тем выражение (7) позволяет ставить вопрос об оптимизации расстановки ОПН без риска их перегрузки.

Отметим также, что оценка (7) дает значение выделенной в ОПН энергии с определенным запасом, так как при решении не учитываются потери на корону и потери в грунте при распространении волны по линии.

Оценка (7) может также быть использована для случая, когда ОПН установлен на линии (рисунок, *б*). Такие схемы в последние годы находят все большее применение. Отличие схем по рисунку, *а* и *б* состоит в том, что в последнем случае ОПН включен «в рассечку» и от него линии отходят в обе стороны. Очевидно, что в этом случае часть волны пройдет в отходящую линию, а энергия, выделенная в ОПН, будет меньше, чем по (7).

Для более аккуратной оценки рассмотрим как делится энергия между ОПН и отходящей линией. Для большей общности рассмотрим задачу о падении волны на ПС, от которой отходят несколько линий. Эквивалентное волновое сопротивление этих линий обозначим как  $Z_{\Sigma}$ . При этом число отходящих линий считаем равным общему числу ли-

Напряжение сети, кВ	Пробивное напряжение $U_{пр}$ , кВ	Волновое сопротивление линии по (3), Ом	Амплитуда импульса $I_0$ , кА	Энергия, кДж		Произведение $W_{уд} U_{н.р}$ ,* кДж
				полная подающего импульса $W_S$	выделенная в ОПН (рисунок, <i>а</i> ) $W_{ОПН}$	
220	1100	450	2,5	235	176	370
330	1600	340	4,7	750	620	1470
500	200	320	6,25	1250	1050	2520
750	2540	300	8,5	2170	1850	4750

\* $W_{уд}$  – удельная энергоемкость ОПН (по [4]);  $U_{н.р}$  – наибольшее длительное рабочее напряжение по паспорту.

ний минус единица. Соответственно для схемы рисунка, б без учета ОПН обозначим  $Z_3 = Z$ .

Напряжение на ПС без учета влияния ОПН

$$U = 2I_0 Z Z_3 / (Z + Z_3).$$

Энергия, выделенная в  $Z_3$ , в этом случае будет меньше энергии падающей волны и определяется по известному соотношению о передаче энергии от источника к приемнику:

$$W_{Z_Y} = W_S \frac{4Z_3^*}{(1+Z_3^*)^2}, \quad (8)$$

где  $W_S$  — полная энергия импульса,  $Z_3^* = Z_3 / Z$ .

Для схемы рисунка, б с учетом ОПН  $Z_3$  определяется как параллельное соединение сопротивления ОПН и волнового сопротивления линии  $Z$ . В качестве грубого приближения примем в качестве сопротивления ОПН результат деления его остающегося напряжения при токе 10 кА на этот ток. Для ОПН 500 кВ такое сопротивление равно 70 Ом. Следовательно  $Z_3 \gg 60$  Ом. По (8) получаем, что энергия, выделенная в ОПН, будет равна  $W_{Z_3} = W_S 0,59 = 737$  кДж.

*Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 12, pp. 57–59.*

## Estimating the Energy Released in Nonlinear Overvoltage Limiters under the Effect of Atmospheric Voltage Surges

E.S. KOLECHITSKII

*A new method for estimating the energy released in overvoltage limiters (OVLs) under the effect of voltage surges arriving to a substation from overhead lines is proposed. The proposed method is based on estimating the energy of an incident impulse. Since the energy carried by the current impulse has a finite value, so is the energy released in the OVL and cannot be greater than the current impulse energy. A formula for determining the total energy carried by the current impulse is derived. That the formula is valid can be ascertained if we consider the problem about a surge arriving to a load the impedance of which is equal to the line surge impedance. The EMTP-ATP computer program can be used for the same purpose. Having determined the full energy of incident surge, it is possible to find the upper limit of the energy that must be dissipated to limit the overvoltage. The list of constraints used in this problem includes the following: limiting the amplitude of incident voltage surge to the power line insulation strength level, the OVL parameters specified by the relevant regulatory documents, and the required overvoltage limitation according to GOST (State Standard) 1516.3–96. It follows from the calculation results that for the voltage classes 220–750 kV, the full energy released in the OVL is equal to around 84% of the incident surge energy. This conclusion allows us to state that, as far as protection from lightning voltage surge is concerned, the OVLs fully perform their functions without being overloaded. It is shown that OVLs installed on overhead lines for reducing the number of lightning-caused disconnections are not overloaded if they are installed on intermediate towers. Recommendations for taking into account the lines outgoing from a substation are suggested, which can be used for optimizing the number of OVLs installed at the substation.*

Key words: substations, power lines, limitation of overvoltages, current impulse, energy

### REFERENCES

1. Gol'dshtein L.D., Zernov N.V. *Elektromagnitnye polya i volny* (Electromagnetic fields and waves). Moscow, Publ. «Sovetskoe radio», 1971, 662 p.
2. www.emtp.org
3. RD 153-34.3–35.125–99. *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setei 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh*

Расчет по программе EMTP дает значение выделенной в ОПН энергии равным 465 кДж. Этот результат дает возможным считать описанный способ оценки энергии в ОПН сверху вполне приемлемым.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. *Электромагнитные поля и волны*. — М.: Советское радио, 1971, 662 с.
2. www.emtp.org
3. РД 153-34.3-35.125–99. *Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений*. — М.: НИИПТ, 1999, 535 с.
4. СТО 56947007-29.120.50.076-2011. *Типовые технические требования к ограничителям перенапряжений классов напряжения 6 – 750 кВ*. — М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2011, 70 с.

[13.03.14]

*Автор: Колечицкий Егор Сергеевич окончил электротехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ – ныне Научно-исследовательский университет (НИУ) «МЭИ») в 1957 г. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию по расчетам электрических полей в энергетике. Профессор кафедры инженерной экологии и охраны труда НИУ «МЭИ».*

*perenapryazhenii* (A Guide to Protection of 6–1150 kV Electric Networks from Lightning Surges and Internal Overvoltages). Moscow, Scientific and Research Institute of the Direct Current, 1999, 535 p.

4. СТО 5694 7007–29.120.50.076–2011. *Tipovye tekhnicheskiye trebovaniya k ogranichitelyam perenapryazhenii klassov napryazheniya 6–750 kV* (Standard Technical Requirements for Overvoltage Limiters for 6–750 kV Voltage Classes). Moscow, JSC «FSK EES», 2011, 70 p.

*Author: Kolechitskii Yegor Sergeevich (Moscow, Russia) – Doctor Techn. Sci., Professor at the Moscow Power Engineering Institute (Scientific and Research University).*