

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ ПО КРИТЕРИЮ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ 6–35 кВ

Канд. техн. наук ГЛУШКО В. И.,  
инженеры ЯМНЫЙ О. Е., КОВАЛЕВ Э. П., БОХАН Н. В.

*РУП «Белэнергосетьпроект»*

В настоящее время во многих странах СНГ идет интенсивная модификация сетей 6–35 кВ на основе заземления нейтрали через резистор. В общем случае выбор типа резисторов производится по критерию перенапряжений, по условию работы релейной защиты и автоматики и условию электробезопасности.

В работе рассматривается задача выбора типа резисторов, а именно – определение сопротивления резисторов по критерию перенапряжений и оценки их защитных функций по коэффициенту кратности перенапряжений.

Выбор типа резисторов по критерию перенапряжений основывается на решении двух основных задач:

- расчете уровня перенапряжений для оценки защитных функций резисторов;
- выборе сопротивления резисторов по критерию перенапряжений.

**Расчет уровня перенапряжений в сетях в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ).** Оценка уровня перенапряжений в сетях в режиме ОЗЗ будем выполнять по коэффициенту кратности перенапряжений  $k_n$ , который характеризует защитные функции резисторов.

К настоящему времени теория расчета уровня перенапряжений в сетях среднего напряжения в режиме ОЗЗ разработана достаточно полно: получены оптимальные алгоритмы расчета, реализованы программы расчета, накоплена информация по результатам расчета. Однако при проектировании резистивного заземления нейтрали разработанные методы расчета не получили широкого применения. Основная причина состоит в сложности процесса расчета, связанной с необходимостью получения в большом объеме информации о сети, составлении расчетных моделей сети, выполнения многовариантных расчетов и др.

В связи с этим актуальной становится задача разработки упрощенных методов расчета уровня перенапряжений. Один из возможных вариантов таких методов расчета рассмотрен в данной статье.

При ОЗЗ происходит процесс разряда емкости фаз на землю и их заряда от источника напряжения, сопровождающийся распространением по сети разрядных волн с положительным знаком и зарядных волн с отрицательным знаком. По аналогии с теорией отражения разрядные волны рассматриваются как падающие волны перенапряжений, а зарядные волны – как отраженные от нагрузки в месте установки резистора (нейтрали) волны перенапряжений. Уровень перенапряжений обуславливается суперпозицией падающих и отраженных волн перенапряжений и характеризуется коэффициентом отражения  $\beta$ .

В соответствии с теорией отражений амплитуда волны перенапряжений  $\dot{U}_n$  представляет собой сумму амплитуд падающей волны  $\dot{U}_{np}$  и отраженной волны  $\dot{U}_{no}$

$$\dot{U}_n = \dot{U}_{np} + \dot{U}_{no}. \quad (1)$$

Амплитуды волн  $\dot{U}_n$ ,  $\dot{U}_{np}$  и  $\dot{U}_{no}$  характеризуются по отношению к фазному напряжению  $\dot{U}_\phi$  соответствующими им коэффициентами кратности перенапряжений  $k_n$ ,  $k_{np}$  и  $k_{no} = k_{np}\beta$ ,  $\dot{U}_n = \dot{U}_\phi k_n$ ;  $\dot{U}_{np} = \dot{U}_\phi k_{np}$  и  $\dot{U}_{no} = \dot{U}_\phi k_{np} \beta$ . С учетом этого для коэффициента кратности перенапряжений  $k_n$  имеем

$$k_n = k_{np}(1 + \beta). \quad (2)$$

В настоящей работе выражение для коэффициента  $\beta$  принято на основе исследования переходных процессов при ОЗЗ и результатов расчетов уровня перенапряжений по специальным программам. При этом для оценки возможного максимального уровня перенапряжений рассматривается случай ОЗЗ на отходящем присоединении, для которого принято  $\beta$  определять по формуле

$$\beta = \frac{\sqrt{R_N^2 + X_C^2} - X_C}{\sqrt{R_N^2 + X_C^2} + X_C}, \quad (3)$$

где  $R_N$  – сопротивление резистора, Ом;  $X_C = \frac{U_\phi}{I_C}$  – емкостное сопротивление сети, Ом;  $I_C$  – емкостный ток сети, А.

С учетом (2) и (3) для коэффициента кратности перенапряжений имеем

$$k_n = \frac{2k_{np}\sqrt{R_N^2 + X_C^2}}{\sqrt{R_N^2 + X_C^2} + X_C} = \frac{A_n\sqrt{R_N^2 + X_C^2}}{\sqrt{R_N^2 + X_C^2} + X_C}, \quad (4)$$

где  $A_n = 2k_{np}$ .

Принципиальной особенностью равенств (3) и (4) является то, что при полном отражении и согласовании линии с нагрузкой выполняются следующие условия:

- для  $R_N^2 \square X_C^2$  и  $\beta = 1$

$$k_n = 2k_{np} = A_n; \quad (5)$$

- для  $R_N^2 \square X_C^2$  и  $\beta = 0$

$$k_n = k_{np}. \quad (6)$$

Эти условия выполняются только при обязательном равенстве амплитуд падающих и отраженных волн перенапряжений.

Будем полагать, что падающие волны перенапряжений с кратностью  $k_{np}$  соответствуют заземлению нейтрали через резистор с сопротивлением,

удовлетворяющим условию  $R_N^2 \ll X_C^2$ . Будем считать, что режим изолированной нейтрали характеризуется повышенным уровнем перенапряжений с кратностью  $A_n = 2k_{mn}$  при  $R_N^2 \ll X_C^2$ .

Информация о средних величинах уровня перенапряжений при резистивном заземлении нейтрали  $k_n$  и изолированной нейтралью сети  $A_n = 2k_{mn}$  является основной необходимой информацией для разработки предлагаемого метода расчета  $k_n$ .

В данной работе величины коэффициента  $k_{mn}$  и  $A_n$  получены из [1], где приведена следующая информация по максимальным величинам коэффициента кратности перенапряжений для сетей:

- 6–10 кВ с изолированной нейтралью  $k_n = 3,55$ ;
- 35 кВ с изолированной нейтралью  $k_n = 3,7$ ;
- 6–10 кВ с резистивным заземлением нейтрали  $k_n = 1,83$ ;
- 35 кВ с резистивным заземлением нейтрали  $k_n = 1,9$ .

Из этой информации по  $k_n$  в качестве базовой величины для  $k_{mn}$  и  $A_n$  принято:

$$k_{mn} = 1,865; \quad (7)$$

$$A_n = 2k_{mn} = 3,73. \quad (8)$$

Принятые величины  $k_{mn}$  и  $A_n$  с погрешностью 0,8–5,0 % приближаются к приведенным в [1].

Следует отметить, что информация о величинах коэффициента кратности перенапряжений в [1] практически полностью соответствует теории отражения волн перенапряжений и может рассматриваться как весьма достоверная.

Из (4) с учетом (8) коэффициент кратности

$$k_n = \frac{3,73\sqrt{R_N^2 + X_C^2}}{X_C + \sqrt{R_N^2 + X_C^2}}. \quad (9)$$

При необходимости выражение для  $k_n$  (9) может уточняться путем обоснованного изменения параметра  $A_n$  в соответствии с (4).

Выражение (9) является базовым для решения основных поставленных задач:

- при заданных  $X_C$  и  $k_n$  определить сопротивление резистора  $R_N$ ;
- при заданных  $X_C$  и  $R_N$  оценить защитные функции резистора по коэффициенту кратности перенапряжений  $k_n$ .

**Определение сопротивления резисторов.** По степени отражения падающих волн перенапряжений от нагрузки резисторы подразделяются на низко- и высокоомные.

Низкоомный резистор позволяет обеспечивать высшую степень защиты сети от перенапряжений и предназначен для создания тока в нейтрали сети при ОЗЗ в десятки и сотни ампер, что позволяет организовать надежную работу РЗА на отключение поврежденного присоединения.

Высокоомный резистор должен обеспечивать достаточную степень защиты сети от перенапряжений, но в обязательном порядке позволяет организовать работу РЗА на отключение либо на сигнал.

Из [2] можно установить границу для сопротивления между низко- и высокоомным резистивным заземлением нейтрали: максимальная величина сопротивления низкоомного резистора и минимальная величина сопротивления высокоомного резистора равна  $X_C$ . С учетом этого признаком типа резистора являются условия:

- для низкоомных резисторов

$$R_N \leq X_C; \quad (10)$$

- для высокоомных резисторов

$$R_N > X_C. \quad (11)$$

Сопротивление резистора  $R_N$  определяется из (9). Представим его в виде

$$k_{\Pi} = \frac{3,73\sqrt{1+K_3^2}}{1+\sqrt{1+K_3^2}}, \quad (12)$$

где  $K_3 = R_N/X_C$  – коэффициент экономической целесообразности, который выбирается из условий компромисса целесообразного уровня ограничения перенапряжений и стоимости резистивной установки [3].

Из (12) для коэффициента  $K_3$  имеем

$$K_3 = 2,73 \frac{\sqrt{k_{\Pi} - 1,865}}{3,73 - k_{\Pi}}. \quad (13)$$

Тогда, учитывая, что  $K_3 = R_N/X_C$ , для сопротивления резистора получим

$$R_N = K_3 X_C \quad (14)$$

или

$$R_N = 2,73 X_C \frac{\sqrt{k_{\Pi} - 1,865}}{3,73 - k_{\Pi}}. \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) являются классической формой представления сопротивления высокоомных резисторов. Впервые такая форма представления  $R_N$  при  $K_3 = 1$  была предложена Петерсеном в 1916 г. [2]. Впоследствии во многих источниках приведены другие величины  $K_3$ , например:  $K_3 = 1-2$  [3, 4];  $K_3 = 1-3$  [5];  $K_3 = 2,2-3,66$  [6].

В общем случае по критерию перенапряжений сопротивление резисторов и соответствующий им коэффициент кратности перенапряжений заключены в пределах: для низкоомных резисторов:  $R_N = 0-X_C$ ;  $k_{\Pi} = 1,865-2,182$ , а для высокоомных резисторов:  $R_N = X_C-\infty$ ;  $k_{\Pi} = 2,182-3,73$ . С учетом этого окончательно сопротивление резисторов определяется следующим образом:

- для низкоомных резисторов:

$$R_N \leq 2,73X_C \frac{\sqrt{k_{п} - 1,865}}{3,73 - k_{п}}; \quad k_{п} = 1,865 - 2,182; \quad (16)$$

- для высокоомных резисторов:

$$R_N > 2,73X_C \frac{\sqrt{k_{п} - 1,865}}{3,73 - k_{п}}; \quad k_{п} = 2,182 - 3,73. \quad (17)$$

Предел  $k_{п} = 3,73$  соответствует изолированной нейтрали сети.

В качестве примера применения (14) и (15) для выбора сопротивления резисторов для сетей 6–35 кВ рассмотрим случай сети с наибольшими нормированными Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) емкостными токами замыкания на землю для сети с изолированной нейтралью:  $I_C = 30$  А – для сетей 6 кВ;  $I_C = 20$  А – для сетей 10 кВ;  $I_C = 10$  А – для сетей 35 кВ. Оценка защитных функций резисторов производится по зависимости  $k_{п} = f(R_N)$ , которая определяется по (9) при:  $X_C = 115,6$  Ом – для сетей 6 кВ;  $X_C = 289,0$  Ом – для сетей 10 кВ;  $X_C = 2023,1$  Ом – для сетей 35 кВ (рис. 1).

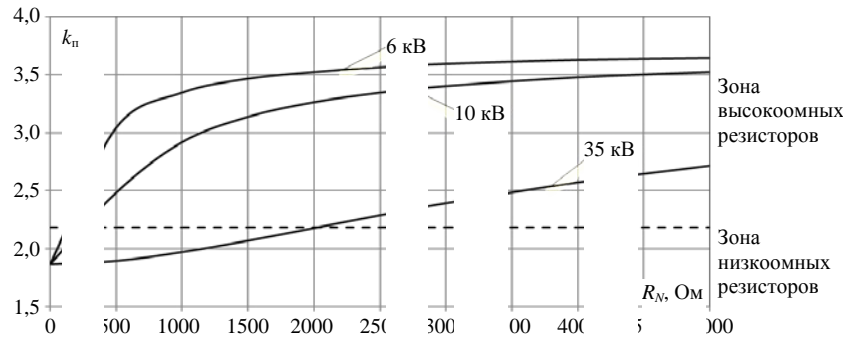


Рис. 1. Зависимость  $k_{п} = f(R_N)$

**Оценка защитных функций резисторов.** Защитные функции резисторов будем оценивать по коэффициенту кратности  $k_{п}$ , который определяется по (9) и (12). С учетом (16) и (17) защитных функций резистивных установок коэффициент  $k_{п}$  заключен в пределы:

- для низкоомных резисторов

$$k_{п} = 1,865 - 2,182; \quad (18)$$

- для высокоомных резисторов

$$k_{п} = 2,182 - 3,73. \quad (19)$$

Для резисторов известного номинала  $R_{Nd}$  (например, действующих резисторов) защитные функции оцениваются по (9)

$$k_{п} = \frac{3,73\sqrt{1 + K_d^2}}{1 + \sqrt{1 + K_d^2}}, \quad (20)$$

где  $K_d = \frac{R_{Nd}}{X_C} = \frac{1}{d_C}$ ,  $d_C$  – коэффициент успокоения сети.

Выражение (20) относительно коэффициента успокоения сети  $d_C = \frac{X_C}{R_{Nd}}$  принимает вид

$$k_n = \frac{3,73\sqrt{1+d_C^2}}{d_C + \sqrt{1+d_C^2}}. \quad (21)$$

Следует особо отметить, что по своей сущности выражения (12) и (20) идентичны. В самом деле, коэффициент  $K_3$  с учетом (14)  $K_3 = R_N/X_C$ , т. е. он формально полностью аналогичен коэффициенту  $K_d = R_{Nd}/X_C$ .

**Оценка погрешности метода расчета сопротивления  $R_N$  и коэффициента  $k_n$ .** Сопротивление резисторов  $R_N$  является основной величиной, которая определяет расчетное выражение для  $k_n$  (9), (12) и (20). С учетом этого погрешность расчета коэффициента  $k_n$  непосредственно характеризует погрешность расчета сопротивления  $R_N$ .

По предлагаемому методу расчета  $k_n$  при оптимальном уровне перенапряжений ( $R_N^2 \square X_C^2$ )  $k_n = 1,865$ , а при максимальном уровне перенапряжений ( $R_N^2 \square X_C^2$ )  $k_n = 3,73$ . Погрешность расчета  $k_n$  для таких случаев получим по [1]. Для сетей с  $K_3 = 1$  и  $K_3 = 2$  погрешности расчета получим по [3, 4]; погрешности расчета  $k_n$  в этом случае определяются по (12). Рассматриваемые погрешности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вид сети, литературный источник	$k_n$ по источнику	$k_n$ по расчету	$ \Delta\% $
Сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью [1]	3,55	3,73	5,0
Сети 35 кВ с изолированной нейтралью [1]	3,7	3,73	0,8
Сети 6–10 кВ с нейтралью, заземленной через резистор, [1]	1,83	1,865	1,9
Сети 35 кВ с нейтралью, заземленной через резистор, [1]	1,9	1,865	1,8
Сети с $K_3 = 1$ [3]	2,2–2,5	2,17	1,4–15,2
Сети с $K_3 = 1$ [4]	2,1	2,17	3,3
Сети с $K_3 = 2$ [3]	2,6–2,7	2,6	0–3,8
Сети с $K_3 = 2$ [4]	2,6	2,6	0

Оценку погрешности расчета  $k_n$  для высокоомных резисторов выполним по результатам расчета  $k_n$  по теории Петерсена применительно к подстанции [7]. Анализировались процессы в типовом расpredустройстве 10 кВ, осуществляющем питание нагрузки через кабельные линии. Рассматривались различные значения емкостных токов:  $I_C = 3; 5; 7; 9$  А, которым соответствовали значения емкостных сопротивлений:  $X_C = 1926; 1156; 826; 642$  Ом. Результаты расчета представлены в [7] в графическом виде функции  $k_n = f(R_N)$ .

В настоящей статье функция  $k_n = f(R_N)$  вычислялась по (20). Погрешность расчета  $k_n$  приведена в табл. 2.

Таблица 2

$R_N$ , Ом		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$I_C = 9$ А ( $X_C = 642$ Ом)	$k_{\text{ши}}$	2,35	2,7	2,95	3,15	3,0	3,45	3,52	3,6	3,7	3,75
	$k_{\text{пр}}$	2,42	2,86	3,09	3,22	3,31	3,37	3,42	3,45	3,48	3,51
	$ \Delta\% $	2,89	5,59	4,53	2,17	9,34	2,32	2,84	4,17	5,95	6,4
$I_C = 7$ А ( $X_C = 826$ Ом)	$k_{\text{ши}}$	2,25	2,5	2,7	2,9	3,05	3,15	3,3	3,36	3,44	3,45
	$k_{\text{пр}}$	2,28	2,7	2,95	3,10	3,21	3,28	3,34	3,38	3,42	3,45
	$ \Delta\% $	1,32	7,41	8,48	6,45	4,98	3,96	1,2	0,59	0,58	0
$I_C = 5$ А ( $X_C = 1156$ Ом)	$k_{\text{ши}}$	2,15	2,3	2,45	2,63	2,75	2,86	2,96	3,06	3,1	3,15
	$k_{\text{пр}}$	2,12	2,49	2,74	2,92	3,04	3,14	3,21	3,26	3,31	3,35
	$ \Delta\% $	1,4	7,63	10,58	9,93	9,54	8,92	7,79	6,13	6,34	5,97
$I_C = 3$ А ( $X_C = 1926$ Ом)	$k_{\text{ши}}$	2,05	2,1	2,2	2,3	2,35	2,45	2,5	2,57	2,6	2,65
	$k_{\text{пр}}$	1,98	2,2	2,42	2,6	2,74	2,86	2,95	3,02	3,09	3,14
	$ \Delta\% $	3,41	4,55	9,09	11,54	14,23	14,34	15,25	14,9	15,86	15,61

Повышенная погрешность и ее характер на отдельных диапазонах изменения параметра  $R_N$  могут быть обусловлены погрешностями предлагаемого метода расчета и обработки авторами материала [7].

#### ВЫВОД

Разработан способ выбора типа резисторов по критерию перенапряжений, включающий метод расчета сопротивления резисторов  $R_N$  и метод расчета коэффициента кратности перенапряжений  $k_n$  для оценки защитных функций резисторов.

Погрешность методов расчета  $R_N$  и  $k_n$  заключается в пределах 0–15,86 %. Средняя погрешность составляет 6,15 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, М. А. Повышение надежности электрических сетей при внедрении современной техники / М. А. Короткевич // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2004. – Вып. 3.
2. P e t e r s e n, W. Erdschlussströme in Hochspannungsnetzen. – ETZ, 1916.
3. И ль и н ы х, М. В. Основные положения по выбору номиналов резисторов для заземления нейтралей сетей 6–35 кВ / М. В. Ильиных, Л. Н. Сарин, А. А. Челаэнов // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ: труды 3-й Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2004.
4. К о р о т к е в и ч, М. А. Выбор мощности заземляющего трансформатора подключения в нейтраль сети напряжением 10 кВ высокоомного резистора / М. А. Короткевич, А. Ю. Окраменко // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2004. – Вып. 3.
5. К а д о м с к а я, К. П. О резистивном заземлении нейтралей в сетях 6–35 кВ различного назначения / К. П. Кадомская, А. Б. Виштибеев // Режимы заземления нейтралей сетей 3–6–10–35 кВ: докл. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2000.
6. В и ш т и б е е в, А. Б. Эффективность резистивного заземления нейтралей в кабельных электрических сетях 6–10 кВ / А. Б. Виштибеев // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ: труды 2-й Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2002.
7. В ы б о р резисторов для ограничения перенапряжений в сети 10 кВ с малыми емкостными токами / М. В. Ильиных [и др.] // Режимы заземления нейтралей сетей 3–6–10–35 кВ: докл. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2000.

Представлена Техническим советом

Поступила 20.10.2009