

И.В. Нижевский, В.И. Нижевский, Б. Инояттов, С. Насриддини

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДОЛИ СТЕКАЮЩЕГО С ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ ПОДСТАНЦИИ ТОКА ПРИ ОДНОФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

*На основі розрахунків і досліджень проведено аналіз розподілу струму однофазного короткого замикання між заземлювачем підстанції та заземлювачем системи «трос-опори», представлених схемою заміщення. Дослідження, виконані для реального діапазону змін параметрів схеми, показали, що опір заземлювача підстанції суттєво впливає на розподіл струму однофазного короткого замикання в схемі. Отримані результати рекомендовано враховувати при проектуванні заземлюючих пристроїв підстанцій.* Бібл. 3, табл. 1, рис. 3.

**Ключові слова:** підстанція, електробезпека, електромагнітна сумісність, заземлюючий пристрій, схема заміщення, струм однофазного короткого замикання, розподіл, алгоритм, розрахунок, аналіз, проектування.

*На основе расчетов и исследований проведен анализ распределения тока однофазного короткого замыкания между заземлителем подстанции и заземлителем системы «трос-опоры», представленных схемой замещения. Исследования, выполненные для реального диапазона изменений параметров схемы, показали, что сопротивление заземлителя подстанции существенно влияет на распределение тока однофазного короткого замыкания в схеме. Полученные результаты рекомендовано учитывать при проектировании заземляющих устройств подстанций.* Библ. 3, табл. 1, рис. 3.

**Ключевые слова:** подстанция, электробезопасность, электромагнитная совместимость, заземляющее устройство, схема замещения, ток однофазного короткого замыкания, распределение, алгоритм, расчет, анализ, проектирование.

**Введение.** Неотъемлемой частью каждой электрической подстанции является заземляющее устройство (ЗУ), которое в современных условиях должно отвечать как требованиям электробезопасности людей и животных, так и требованиям электромагнитной совместимости установленного на ней электрооборудования. Эти требования направлены на решение задач защиты от перенапряжений и помех, возникающих при импульсных токах молнии и коммутациях. Следует подчеркнуть, что в решении этих задач главную роль играют геометрические параметры и электрические характеристики заземляющих устройств подстанций. Определение и анализ указанных параметров и характеристик при проектировании позволяют свести к минимуму опасные их воздействия на микропроцессорные устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи при эксплуатации.

**Цель статьи.** Исследовать распределение тока однофазного короткого замыкания (ОКЗ) в ЗУ подстанции.

**Постановка задачи.** Заземлитель подстанции, согласно ПУЭ [1], должен выполняться в виде потенциаловывравнивающей сетки из продольных и поперечных электродов, уложенной на ее территории на глубине 0,5-0,7 м. Расстояние между поперечными полосами сетки регламентируется принимать увеличивающимся от периферии к центру заземляющей сетки, причем первое и последующие расстояния, начиная от периферии, не должны превышать соответственно 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11,0; 13,5; 16,0; 20,0 м и т.д. При таком построении сетки размеры ячеек увеличиваются от периферии к центру. Целью такого расположения поперечных электродов является выравнивание потенциалов на поверхности земли на территории открытого распределительного устройства при стекании тока ОКЗ с заземлителя подстанции в землю. В случае одинаковых ячеек сетки напряжение прикосновения в центральной ячейке будет меньше, чем в угловой, которая имеет наибольшее значение напряжения прикосновения.

Заманчивым является нормирование ЗУ по допустимому напряжению прикосновения, так как оно позволяет сократить размеры ЗУ и расход металла, причем в ряде случаев существенно. Однако при этом нормировании необходимо обязательно проанализировать все возможные режимы работы сети, в которой находится подстанция. Для этого необходимо выполнить расчет сети для заданной точки ОКЗ с целью получения максимального и минимального значений токов ОКЗ. Такой расчет позволит выделить составляющие тока ОКЗ от системы и от потребителей. Полученные составляющие тока ОКЗ дают возможность проанализировать работу как основных, так и резервных защит примыкающих к подстанции воздушных линий (ВЛ) в разных режимах.

Вполне очевидно, что ток при ОКЗ в начале линии больше, чем при ОКЗ в конце линии, причем различие этих токов тем существеннее, чем большую протяженность имеет линия. А это значит, что первая быстродействующая ступень защиты нулевой последовательности в большинстве случаев не будет охватывать всю линию.

Следовательно, в этом случае при ОКЗ в конце линии будет действовать в качестве основной защиты последующая ступень: вторая (выдержка времени 0,6 с); третья (выдержка времени 1,1 с); и т.д. А в случае последующего действия резервной защиты время ее действия еще больше. При таком развитии событий предельно допустимые напряжения прикосновения на подстанции существенно снижаются.

Только в результате такого анализа, в том числе и после очередного обследования ЗУ [2], можем сделать вывод о том, что полученное ЗУ соответствует или не соответствует требованиям ГОСТ12.1.038-82 [3].

В случае нормирования ЗУ подстанции по величине сопротивления заземлителя, потенциал на ЗУ определяется стекающим с него током и может превышать допустимый согласно ПУЭ потенциал.

© И.В. Нижевский, В.И. Нижевский, Б. Инояттов, С. Насриддини

В обоих случаях нормирования параметров заземляющих устройств подстанций необходимо знать долю стекающего с заземлителя подстанции тока при ОКЗ в электрической сети.

**Основные результаты исследования.** Рассмотрим в качестве примера подстанцию 110/35 кВ. Длину защищенного подхода на ВЛ примем равной 2 км. Грозозащитный трос защищенного подхода на каждой ВЛ обязательно присоединяется к заземлителю подстанции. Величина сопротивления ЗУ на каждой опоре в пределах защищенного подхода для всех ВЛ, примыкающих к подстанции, не должна превышать допустимых согласно ПУЭ значений.

При замыкании фазы на землю на ВЛ ток ОКЗ возвращается к источнику как через заземлитель самой подстанции, так и через ЗУ опор ВЛ, соединен-

ных тросом по всей длине защищенного подхода, которая регламентируется ПУЭ и составляет 1-4 км в зависимости от номинального напряжения ВЛ. Грозозащитный трос защищенного подхода на каждой ВЛ обязательно присоединяется к заземлителю подстанции. Величина сопротивления ЗУ на каждой опоре в пределах защищенного подхода для всех ВЛ, примыкающих к подстанции, не должна превышать допустимых согласно ПУЭ значений.

Сопротивление заземлителя системы «трос-опоры» на длине защищенного подхода определяется по схеме замещения, изображенной на рис. 1.

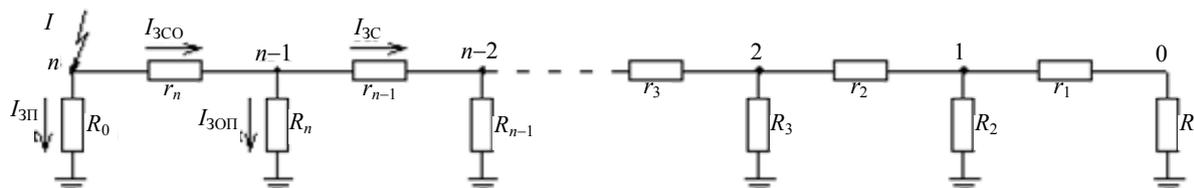


Рис. 1. Схема замещения для расчета сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» на длине защищенного подхода:  $r_n$  – активное сопротивление траса в пролете;  $R_n$  – сопротивление ЗУ опоры;  $R_0$  – сопротивление заземлителя подстанции

Алгоритм расчета сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» представим в следующем виде

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{(R_1 + r_1)R_2}{R_1 + r_1 + R_2}; \\
 a_2 &= \frac{(a_1 + r_2)R_3}{a_1 + r_2 + R_3}; \\
 a_3 &= \frac{(a_2 + r_3)R_4}{a_2 + r_3 + R_4}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 a_{n-2} &= \frac{(a_{n-3} + r_{n-2})R_{n-1}}{a_{n-3} + r_{n-2} + R_{n-1}}; \\
 a_{01} &= a_{n-2} + r_{n-1}; \\
 a_{n-1} &= \frac{(a_{n-2} + r_{n-1})R_n}{a_{n-2} + r_{n-1} + R_n}; \\
 a_{02} &= a_{n-1} + r_n; \\
 a_n &= \frac{(a_{n-1} + r_n)R_0}{a_{n-1} + r_n + R_0},
 \end{aligned}$$

где  $n$  – число опор на длине защищенного подхода.

Рассмотрим характер распределения тока ОКЗ по отдельным элементам схемы, изображенной на рис. 1.

Ток ОКЗ ( $I$ ) в схеме замещения стекает с заземлителя подстанции ( $I_{zn}$ ), а оставшая часть тока ( $I_{зсо}$ ) стекает с заземлителя системы «трос-опоры», причем часть последнего стекает с заземлителя конечной опоры ( $I_{зон}$ ), а оставшаяся часть тока ( $I_{зс}$ ) стекает с оставшейся части заземлителя системы и т.д. Относительная величина этих токов рассчитывается по выражениям:

$$\begin{aligned}
 \frac{I_{zn}}{I} &= \frac{a_{02}}{a_{02} + R_0}; & \frac{I_{зсо}}{I} &= \frac{R_0}{a_{02} + R_0}; \\
 \frac{I_{зон}}{I} &= \frac{a_{01}}{a_{01} + R_n} \cdot \frac{R_0}{a_{02} + R_0}; & \frac{I_{зс}}{I} &= \frac{R_n}{a_{01} + R_n} \cdot \frac{R_0}{a_{02} + R_0}.
 \end{aligned}$$

Результаты выполненных расчетов для ряда вариантов сопротивлений и токов по вышеприведенным формулам при варьировании сопротивления заземли-

теля подстанции  $R_0$  и сопротивления заземлителя опор  $R_n$  представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при сопротивлении заземлителя подстанции  $R_0 = 4$  Ом увеличение сопротивления заземлителя опор  $R_n$  от 5 Ом до 30 Ом приводит к увеличению доли тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции, соответственно от 29 % до 54,5 %, т.е. наблюдается прирост на 25,5 %. При сопротивлении заземлителя подстанции  $R_0 = 1$  Ом аналогичное увеличение прироста доли тока составляет 20,7 %, при  $R_0 = 0,5$  Ом – 14,9 %, при  $R_0 = 0,2$  Ом – 6,9 %, при  $R_0 = 0,1$  Ом – 3,7 %, при  $R_0 = 0,01$  Ом – 0,4 %.

Кроме того, даже при минимальном значении сопротивления заземлителя опор  $R_n = 5$  Ом уменьшение сопротивления заземлителя подстанции приводит к увеличению доли тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции. Так, например, при сопротивлении заземлителя подстанции  $R_0 = 4$  Ом доля тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции, составляет 29 %, а при  $R_0 = 0,5$  Ом доля тока ОКЗ составляет 76,6 %. Дальнейшее снижение  $R_0$  приводит к увеличению доли тока, стекающего с заземлителя подстанции, но при этом в рассматриваемом диапазоне изменений сопротивлений ЗУ опор  $R_n$  прирост тока уменьшается.

На рис. 2 представлены результаты исследований для случая одной примыкающей к подстанции линии, т.е. самого тяжелого случая.

Как следует из графиков (рис. 2), например, для случая, когда  $R_n = 10$  Ом, а  $R_0 = 0,5$  Ом, с ростом величины сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» доля тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции, увеличивается нелинейно, а доля тока ОКЗ, стекающего с заземляющих устройств опор (сопротивление системы  $a_{02}$ ), соответственно должна уменьшаться.

И, действительно, с другой стороны, если сопротивление заземлителя подстанции остается неизменным, а сопротивление системы изменяется, то кривые зависимости, как показано на рис. 3, свидетельствуют о том, что с ростом величины сопротивления заземлителя каждой опоры в системе «трос-опоры» доля стекающего с последней тока ОКЗ нелинейно уменьшается.

Таблица 1

$R_0$	$R_{1-n}$	$a_{01}$	$a_0$	$a_{02}$	$a_{\text{рез}}$	$I_{3п}/I$	$I_{3со}/I$	$I_{3оп}/I$	$I_{3с}/I$
4	5	2.26	1.56	1.64	1.16	0.29	0.709	0.22	0.49
	10	3.07	2.35	2.43	1.51	0.38	0.622	0.146	0.476
	15	3.747	2.998	3.082	1.741	0.435	0.565	0.113	0.452
	20	4.378	3.592	3.676	1.915	0.479	0.521	0.094	0.428
	25	4.984	4.155	4.239	2.058	0.515	0.485	0.081	0.405
	30	5.576	4.702	4.786	2.179	0.545	0.455	0.071	0.384
2	5	2.26	1.56	1.64	0.9	0.45	0.55	0.17	0.38
	10	3.065	2.346	2.43	1.097	0.549	0.451	0.106	0.346
	15	3.747	2.998	3.082	1.213	0.606	0.394	0.079	0.315
	20	4.378	3.592	3.676	1.295	0.648	0.352	0.063	0.289
	25	4.984	4.155	4.239	1.359	0.679	0.321	0.053	0.267
	30	5.576	4.702	4.786	1.41	0.705	0.295	0.046	0.249
1	5	2.26	1.56	1.64	0.62	0.62	0.379	0.118	0.261
	10	3.065	2.346	2.43	0.708	0.708	0.292	0.068	0.223
	15	3.747	2.998	3.082	0.755	0.755	0.245	0.049	0.196
	20	4.378	3.592	3.676	0.786	0.786	0.214	0.038	0.175
	25	4.984	4.155	4.239	0.809	0.809	0.191	0.032	0.159
	30	5.576	4.702	4.786	0.827	0.827	0.173	0.027	0.146
0.5	5	2.26	1.56	1.64	0.38	0.766	0.234	0.073	0.161
	10	3.065	2.346	2.43	0.415	0.829	0.171	0.04	0.131
	15	3.747	2.998	3.082	0.43	0.86	0.14	0.028	0.112
	20	4.378	3.592	3.676	0.44	0.88	0.12	0.022	0.098
	25	4.984	4.155	4.239	0.447	0.895	0.105	0.018	0.088
	30	5.576	4.702	4.786	0.453	0.905	0.095	0.015	0.08
0.2	5	2.26	1.556	1.64	0.178	0.891	0.109	0.034	0.075
	10	3.065	2.346	2.43	0.185	0.924	0.076	0.018	0.058
	15	3.747	2.998	3.082	0.188	0.939	0.061	0.012	0.049
	20	4.378	3.592	3.676	0.19	0.948	0.052	$9.27 \cdot 10^{-3}$	0.042
	25	4.984	4.155	4.239	0.191	0.955	0.045	$7.5 \cdot 10^{-3}$	0.038
	30	5.576	4.702	4.786	0.192	0.96	0.04	$6.3 \cdot 10^{-3}$	0.034
0.1	5	2.258	1.556	1.64	0.094	0.943	0.057	0.018	0.04
	10	3.065	2.346	2.43	0.096	0.96	0.04	0.0093	0.03
	15	3.747	2.998	3.082	0.097	0.969	0.031	$6.3 \cdot 10^{-3}$	0.025
	20	4.378	3.592	3.676	0.097	0.974	0.026	$4.76 \cdot 10^{-3}$	0.022
	25	4.984	4.155	4.239	0.098	0.977	0.023	$3.83 \cdot 10^{-3}$	0.019
	30	5.576	4.702	4.786	0.098	0.98	0.02	$3.2 \cdot 10^{-3}$	0.017
0.01	5	2.258	1.556	1.64	$9.95 \cdot 10^{-3}$	0.994	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.89 \cdot 10^{-3}$	$4.178 \cdot 10^{-3}$
	10	3.065	2.346	2.43	$9.95 \cdot 10^{-3}$	0.996	$4 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-4}$	$3.137 \cdot 10^{-3}$
	15	3.747	2.998	3.082	$9.97 \cdot 10^{-3}$	0.997	$3 \cdot 10^{-3}$	$6.47 \cdot 10^{-4}$	$2.59 \cdot 10^{-3}$
	20	4.378	3.592	3.676	$9.97 \cdot 10^{-3}$	0.997	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$4.87 \cdot 10^{-4}$	$2.23 \cdot 10^{-3}$
	25	4.984	4.155	4.239	$9.98 \cdot 10^{-3}$	0.988	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$1.96 \cdot 10^{-3}$
	30	5.576	4.702	4.786	$9.98 \cdot 10^{-3}$	0.998	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$1.76 \cdot 10^{-3}$

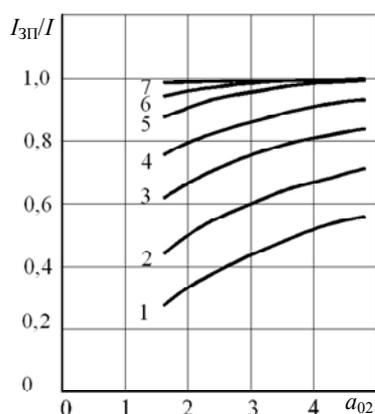


Рис. 2. Зависимость доли тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции, от величины сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» при сопротивлении заземлителя подстанции  $R_0$ :  
 1 –  $R_0 = 4$  Ом; 2 –  $R_0 = 2$  Ом; 3 –  $R_0 = 1$  Ом; 4 –  $R_0 = 0,5$  Ом;  
 5 –  $R_0 = 0,2$  Ом; 6 –  $R_0 = 0,1$  Ом; 7 –  $R_0 = 0,01$  Ом

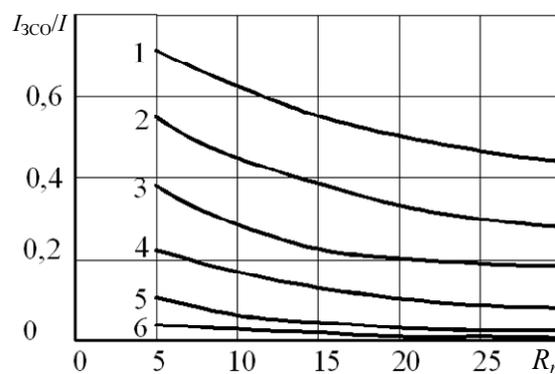


Рис. 3. Зависимость доли тока ОКЗ, стекающего с заземлителя системы «трос-опоры», от величины сопротивления заземлителя каждой опоры при сопротивлении заземлителя подстанции  $R_0$ :  
 1 –  $R_0 = 4$  Ом; 2 –  $R_0 = 2$  Ом; 3 –  $R_0 = 1$  Ом;  
 4 –  $R_0 = 0,5$  Ом; 5 –  $R_0 = 0,2$  Ом; 6 –  $R_0 = 0,1$  Ом

**Вывод.** С использованием алгоритма расчета сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» на основе ее схемы замещения исследовано распределение тока однофазного короткого замыкания между заземлителем подстанции и заземлителем системы «трос-опоры». Исследование выполнено для реального диапазона изменений как сопротивления заземлителя подстанции, так и сопротивления заземлителей опор воздушных линий. Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании заземлителей подстанций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом [Чинний від 29.06.2011]. – К.: Міненерговугілля України, 2011. – 72 с. – (Національний стандарт України).
2. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 [Чинний від 29.03.2010]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
3. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Часть 3. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – С. 237-243.

#### REFERENCES

1. *Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. Rozdil 1. Zagal'ni pravila. Glava 1.7. Zazemlennya i zakhisni zakhodi vid urazhennya elektrichnim strumom* [Rules of the device electroinstallations. Chapter 1. General rules. Grounding and protective measures against electric shock]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2011. 72 p. (Ukr).
2. *Viprobuvannya ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. SOU 31.2-21677681-19:2009* [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. (Ukr).
3. *GOST 12.1.038-82. Sistema standartov bezopasnosti truda. Elektro-bezopasnost'. Predel'no dopustimye znachenija naprjazhenij prikosnovenija i tokov. Chast' 3* [State Standard 12.1.038-82. Occupational safety standards system. Electrical. Maximum allowable values of voltages of touch and currents. Part 3]. Moscow, IPK-standards Publ., 1996. pp. 237-243. (Rus).

*Поступила (received) 27.12.2014*

*Нижевский Илья Викторович<sup>1</sup>, инженер,  
Нижевский Виктор Ильич<sup>1</sup>, доц., к.т.н.,  
Инояттов Бехруз<sup>1</sup>, студент,  
Насриддини Саид<sup>1</sup>, студент,  
<sup>1</sup>Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076977, e-mail: nivich1@mail.ru*

*I.V. Nizhevskiy<sup>1</sup>, V.I. Nizhevskiy<sup>1</sup>, B. Ynoyatov<sup>1</sup>, S. Nasryddyny<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine  
**Investigation and calculation of valleys of outgoing from  
substation grounding conductors for short-circuit  
in single-phase short of electrical grid.***

***Introduction.** Earthing device electrical substation in modern conditions must meet both the requirements of electrical safety of people and animals, as well as electromagnetic compatibility requirements established her electrical equipment. These requirements are intended to address issues of protection against surges and interference caused by lightning impulse currents and switching. **Aim.** To investigate the distribution of single-phase short-circuit current in the substation grounding devices. **Task.** On the basis of the proposed design scheme of substitution substation grounding device, consisting of a substation earthing system and «cable-supported» an algorithm for calculating the resistance of the grounding device substation and distribution of single-phase short-circuit current on the circuit elements. **Method.** Mathematical modeling and calculation engine. **Results.** On the basis of calculations and studies analyzed the current distribution of single-phase short-circuit between the substation earthing system and earthing «rope-reliance». Studies carried out for the actual range of variation of the circuit parameters, showed that the earthing resistance substation substantially affects the current distribution in the one-phase short circuit fault. For example, using the graph shows that with increasing resistance grounding system of "rope-supported" the proportion of single-phase short-circuit current flowing from the substation earthing increases, while the proportion of single-phase short-circuit current flowing from the grounding device supports decreases and vice versa. In addition, when rationing grounding systems at substations for the touch voltage is necessary to analyze all the possible modes of operation of the network, which is substationed. **Conclusion.** The results obtained are recommended to take into account in the design of grounding systems at substations. References 3, tables 1, figures 3.  
**Key words:** substation, electrical safety, electromagnetic compatibility, grounding device, equivalent circuit, single-phase short-circuit current, distribution, algorithm, calculation, analysis, design.*