

УДК 621.316.99

Н.В. Коробкин, К.И. Нетреба

**ВЛИЯНИЕ АКТИВНО-ИНДУКТИВНЫХ СВОЙСТВ
ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
НА УРОВНИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ В ОПОРУ ЛЭП**

N.V. Korovkin, K.I. Netreba

**THE EFFECT OF ACTIVE-REACTIVE CHARACTERISTICS
OF GROUNDING SYSTEM ON OVERVOLTAGE LEVELS
UNDER LIGHTNING STROKE TO POWER TRANSMISSION LINE SUPPORT**

В статье рассмотрена методика определения *RLC*-схем замещения заземляющих (ЗУ) устройств при действии грозовых импульсов. Проведена оценка влияния модели ЗУ на уровни перенапряжений, возникающих на защищаемом объекте при ударе молнии в близлежащую опору.

ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА; СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЗУ; ПЕРЕХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ; *RLC* МОДЕЛИ.

The article considers the methods of determination of grounding system *RLC* equivalent circuit under lightning effects. It is carried out the evaluation of influence of grounding system model on overvoltage at the substation after lightning stroke to the neighboring power transmission line support.

GROUNDING SYSTEM; EQUIVALENT CIRCUIT OF GS; TRANSIENT RESISTANCE; *RLC* MODELS.

Стационарное сопротивление, определяемое экспериментальным или расчетным путем, — основная интегральная характеристика заземляющего устройства (ЗУ) как в России, так и в других странах [1, 2]. На частотах грозового импульса существенное влияние на процессы растекания тока оказывает индуктивность ЗУ, а при высоком удельном сопротивлении грунта — и его емкость. В подобных задачах широкое распространение нашло понятие «импульсного» сопротивления — $R_{и} = \max(u)/\max(i)$ или $r_{и}(t) = u(t)/i(t)$. Отметим, что в теоретической электротехнике под импульсным сопротивлением традиционно понимается реакция цепи на функцию Дирака [3], поэтому термин «импульсное» сопротивление, используемый в теории заземления, взят в кавычки.

«Импульсное» сопротивление $R_{и}$ — чисто расчетная величина, зависящая от частоты. Поэтому при изменении длительности входного

импульса для него вводятся поправочные коэффициенты [4]. В работе [5] показано, что между «импульсными» сопротивлениями, полученными при двух разных воздействиях — апериодическом и затухающем колебательном, корреляции не наблюдается.

Несмотря на отмеченные недостатки, «импульсное» сопротивление рассматривается как основная импульсная характеристика ЗУ, на основе которой ведутся экспериментальные и теоретические исследования. В научной среде признается условность понятия «импульсного» сопротивления, отсутствие под ним теоретической основы, однако в практических задачах расчета, измерения и сопоставления импульсных характеристик ЗУ «импульсное» сопротивление рассматривается как безальтернативный параметр.

Цель нашей работы — оценка влияния активно-индуктивных свойств ЗУ на уровни пере-

напряжений, возникающих на защищаемых объектах при ударе молнии. Для учета индуктивных свойств ЗУ используется методика, представленная в [6–8] и кратко описанная ниже.

Переходное сопротивление и синтез RLC-схем замещения ЗУ

В методике построения RLC-моделей ЗУ в качестве первичного параметра устройства используется переходное сопротивление $z(t)$, численно равное напряжению ЗУ при воздействии единичного скачка тока и определяемое по осциллограммам напряжения для любого испытательного импульса тока. Схема замещения ЗУ можно трактовать как некоторую математическую модель, связывающую ток $i(t)$ и напряжение $u(t)$ ЗУ при действии грозových импульсов. В предположении линейности процессов эти величины связаны между собой интегралом Дюамеля:

$$u(t) = i(0)z(t) + \int_0^t z(t-x)i'(x)dx. \quad (1)$$

Величина $z(t)$ инвариантна к форме и длительности импульса тока молнии. Задача построения схемы замещения ЗУ состоит в определении структуры и параметров этой схемы, наилучшим образом согласующихся с экспериментальными данными.

Задача определения переходного сопротивления двухполюсника по заданному напряжению и току относится к классу обратных задач электротехники [9]. Синтез схемы замещения ЗУ сводится к аппроксимации $z(t)$ во временной области, а задача подбора параметров схемы — к задаче поиска минимума функционала при линейных ограничениях на параметры минимизации. Поскольку задача подбора параметров может оказаться не унимодальной, предпочтение отдается «мягким» методам оптимизации (генетический алгоритм, алгоритм пчелиной колонии, метод имитации отжига), позволяющим решить задачу поиска глобального минимума оптимизируемой функции.

Оценка влияния модели ЗУ на расчетные уровни перенапряжений при ударах молнии

Проанализируем влияние активно-индуктивных свойств ЗУ на уровни перенапряжений, возникающих при ударе молнии. Пусть на устано-

вившийся синусоидальный режим сети 150 кВ в момент максимума напряжения накладывается стандартный грозовой импульс 1,2/50 мкс с амплитудой 350 кВ. Волна перенапряжения распространяется к подстанции (ПС) по линии Л1. Ограничитель перенапряжения (ОПН) установлен на расстоянии 450 м от ПС и соединен с ЗУ.

Рассмотрим ряд моделей ЗУ. В первом случае (рис. 1, а) рассмотрим резистивную модель ЗУ. Во втором случае (рис. 1, б) ЗУ эквивалентуруется упрощенно, частью полной схемы замещения. В третьем случае (рис. 1, в) используем полную схему замещения ЗУ, полученную в [6–8], где в качестве основного параметра ЗУ рассматривалось его переходное, а не «импульсное» сопротивление.

Согласно результатам расчета, представленным на рис. 2, модель ЗУ оказывает большое влияние на максимальные уровни перенапряжений, возникающих на ПС и на ОПН. Использование в качестве модели ЗУ RLC-схем замещения приводит к появлению выраженных максимумов при возникновении любых возмущений. Так, для резистивной модели при первом срабатывании ток через ОПН моментально увеличивается, ограничивая напряжение.

Для RLC-схемы из-за наличия индуктивности ток через ОПН не может измениться моментально, вследствие чего возникает переходный процесс, определяющий более высокое максимальное значение перенапряжения. Как видим, максимальное напряжение на ОПН занижено на 10,3 %, что существенно. Для ПС погрешности в величинах первых максимумов будут еще больше из-за обусловленного переходным процессом удвоения максимума, что

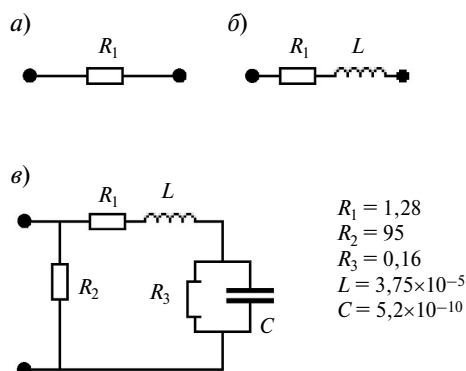


Рис. 1. Модели ЗУ и их параметры в СИ

Отклонения максимумов перенапряжений (относительно полной схемы замещения)

ЗУ	$\bar{U}_{\text{нз}}^{(1)}, \%$	$\bar{U}_{30}^{(1)}, \%$	$\bar{U}_{\text{нз}}^{(2)}, \%$	$\bar{U}_{30}^{(2)}, \%$	$\bar{U}_{\text{нз}}^{(3)}, \%$	$\bar{U}_{30}^{(3)}, \%$
R_1	-10,3	-13,8	-12,4	2,5	-4,9	9,1
$R_1 \cdot 10$	-6,6	-9,3	-6,1	3,0	0,5	5,9
RL	6,9	9,1	17,94	9,8	-6,2	9,7

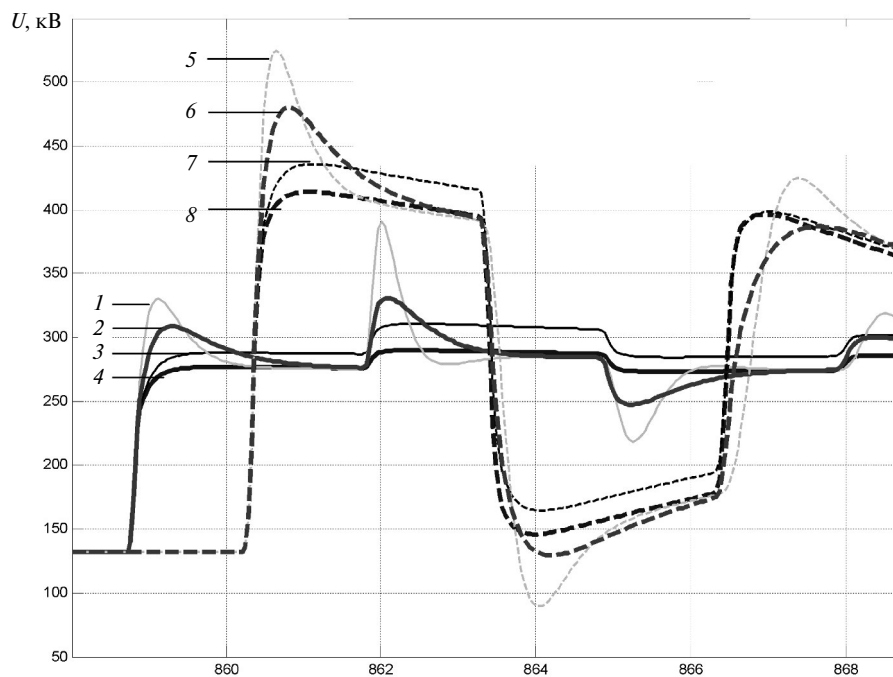


Рис. 2. Напряжения на ОПН (1, 2, 3, 4) и ПС (5, 6, 7, 8) для разных вариантов схем замещения ЗУ (см. табл. отклонения максимумов (относительно полной схемы замещения)):

— R_1 ; — $R_1 \cdot 10$; — RL -схема; — полная схема

не учитывается в рамках резистивной модели (таблица, рис. 2). При использовании резистора в качестве модели ЗУ максимальный уровень перенапряжения на ПС занижен на 13,8 % по сравнению с перенапряжением, возникающим при использовании полной схемы. В качестве компенсации активно-индуктивного характера ЗУ иногда предлагается увеличить величину активного сопротивления. Такой подход, как показывают расчеты, не дает должной качественной и количественной корреляции. При увеличении активного сопротивления заземлителя в десять раз (с 1,28 до 12,8 Ом) разница в максимумах перенапряжений остается довольно существенной (кривые 2, 3 и 6, 7 на рис. 2). В то же время приближенный учет

индуктивного характера заземлителя дает искаженные результаты. В данном случае результат завышен (кривые 4, 8 на рис. 2).

Модель ЗУ оказывают значительное влияние на расчетные максимальные уровни перенапряжений, возникающих на объектах при ударе молнии. Приближенный учет активно-индуктивных свойств ЗУ в рамках резистивной модели не дает должной качественной и количественной корреляции. Анализируемая в данной работе методика моделирования ЗУ позволяет более точно оценить их параметры и при необходимости определить, какие корректировки необходимо вносить в систему грозозащиты для ее надежного функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 153–34.0–20.525–00. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. М.: Изд-во СПО ОРГРЭС, 2000.
2. Methods for measuring the earth resistance of transmission towers equipped with earth wires / Technical Brochure № 275, WG C4.2.O2 // *Electra*. 2005. № 220.
3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. СПб.: Питер, 2003.
4. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. М.: Энергия, 1979.
5. Целебровский Ю.В., Нестеров С.В., Цилько В.А. Импульсные сопротивления заземления молниеотводов ОРУ подстанций // Первая Российская конф. по молниезащите: Сб. докл. / Сибирск. энерг. академия. Новосибирск, 2007. С. 243–248.
6. Нетреба К.И., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И., Шишигин С.Л., Миневи́ч Т.Г., Ненасhev А.П., Парфенов А.А. Синтез RLC моделей заземляющих устройств опор воздушных линий с тросом импульсным методом // *Воздушные линии*. 2012. № 4(9). С. 61–68.
7. Нетреба К.И., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И., Шишигин С.Л., Миневи́ч Т.Г., Ненасhev А.П., Парфенов А.А. Электромагнитные параметры заземляющих устройств при импульсных воздействиях. [Электрон. ресурс] III-я российская конф. по молниезащите. 22–23 мая 2012. Санкт-Петербург.
8. Нетреба К.И., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И., Шишигин С.Л. Идентификация RLC параметров заземляющих устройств опор воздушных линий с тросом импульсным методом // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2010. №1–1. С. 26–32.
9. Коровкин Н.В., Чечурин В.Л., Потие́нко А.А. Обратные задачи в теоретической электротехнике. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.

REFERENCES

1. RD 153–34.0–20.525–00. Metodicheskiye ukazaniya po kontrolyu sostoyaniya zazemlyayushchikh ustroystv elektroustanovok. M.: SPO ORGRES, 2000. (rus.)
2. Methods for measuring the earth resistance of transmission towers equipped with earth wires / Technical Brochure № 275, WG C4.2.O2. *Electra*. 2005. № 220. (rus.)
3. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: V 3-kh t. SPb.: Piter, 2003.
4. Ryabkova Ye.Ya. Zazemleniya v ustanovkakh vysokogo napryazheniya. M.: Energiya, 1979. (rus.)
5. Tselebrovskiy Yu.V., Nesterov S.V., Tsilko V.A. spul'snyye soprotivleniya zazemleniya molniyeotvodov ORU podstantsiy. *Pervaya Rossiyskaya konf. po molniyezashchite: Sb. dokl. Sibirsk. energ. akademiya*. Novosibirsk, 2007. S. 243–248. (rus.)
6. Netreba K.I., Bocharov Yu.N., Korovkin N.V., Krivosheyev S.I., Shishigin S.L., Minevich T.G., Nenashev A.P., Parfenov A.A. Sintez RLC-modeley zazemlyayushchikh ustroystv opor vozdushnykh liniy s trosom impul'snym metodom. *Vozdushnyye linii*. 2012. № 4(9). S. 61–68. (rus.)
7. Netreba K.I., Bocharov Yu.N., Korovkin N.V., Krivosheyev S.I., Shishigin S.L., Minevich T.G., Nenashev A.P., Parfenov A.A. Elektromagnitnyye parametry zazemlyayushchikh ustroystv pri impulsnykh vozdeystviyakh. [Elektron. resurs] *III-ya rossiyskaya konf. po molniyezashchite*. 22–23 maya 2012, Sankt-Peterburg. (rus.)
8. Netreba K.I. Bocharov Yu.N., Korovkin N.V., Krivosheyev S.I., Shishigin S.L. Identifikatsiya RLC parametrov zazemlyayushchikh ustroystv opor vozdushnykh liniy s trosom impul'snym metodom. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2010. №1. T. 1. S. 26–32. (rus.)
9. Korovkin N.V., Chechurin V.L., Potiyenko A.A. Obratnyye zadachi v teoreticheskoy elektrotekhnike. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРОВКИН Николай Владимирович — доктор технических наук заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: Nikolay.korovkin@gmail.com
НЕТРЕБА Кирилл Иванович — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: knete-87@mail.ru

AUTHORS

KOROVKIN Nikolai V. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: Nikolay.korovkin@gmail.com
NETREBA Kirill I. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: knete-87@mail.ru