

Е.П.ЕРЕМЕЕВА, НТУ «ХПИ»;

Г.М.КОЛИУШКО, НТУ «ХПИ»;

Д.Г.КОЛИУШКО, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»;

В.В.КРИВУЩЕНКО, НТУ «ХПИ»;

А.А.ПЕТКОВ, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАТРАТ НА ПРОВЕДЕНИЕ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ПО ВОСТАНОВЛЕНИЮ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ.

У роботі наведений аналіз об'єму відновлювальних горизонтальних заземлювачів на 322 підстанціях напругою 35 – 330 кВ. Запропонована прогнозна модель довжини горизонтальних заземлювачів, необхідних для ремонту заземлюючого пристрою.

In work proofs the test of volume restorative splints on 322 substations voltage 35 – 330 kV. Propose the prognostic model of length of the tyres necessary for repair of the earthing device is offered.

Постановка проблемы. Заземляющее устройство (ЗУ) является одним из основных элементов электроустановки и играет исключительно важную роль в обеспечении нормального функционирования оборудования энергообъекта и безопасности обслуживающего персонала [1]. В настоящий момент электроэнергетика Украины использует подстанции, которые в основной массе (порядка 90 %) были введены в эксплуатацию 20 и более лет назад. Информация о конструктивном выполнении ЗУ, как правило, утеряна, либо недостоверна, так как ЗУ претерпевает существенные изменения под воздействием ряда факторов: отступления от проекта на стадии монтажа ЗУ, замена оборудования или расширение объекта, коррозия ЗУ.

Для проверки конструктивного исполнения ЗУ объектов электроэнергетики в настоящее время используется электромагнитная методика диагностики, которая позволяет без вскрытия грунта и отключения оборудования определить реальное расположение ЗУ [2]. Однако, кроме получения информации о текущем состоянии ЗУ, не менее важным вопросом является разработка рекомендаций и их выполнение для приведения ЗУ к требованиям нормативных документов. Как показала практика, затраты на проведение ремонтных работ, как правило, превышают стоимость диагностики (иногда в 5 и более раз). Поэтому становится актуальной проблема расчета стоимости работ по восстановлению ЗУ до выполнения работ по электромагнитной диагностике.

Используя данные по рекомендациям на ранее обследованных подстанциях, можно выделить следующие основные факторы, которые влияют на длину рекомендованных горизонтальных заземлителей (ГЗ): класс напряже-

ния; первоначальная длина выявленных ГЗ; размер объекта; удельное электрическое сопротивление грунта на территории размещения объекта; значение тока однофазного короткого замыкания в сети с глухозаземленной нейтралью; допустимое значение напряжения прикосновения [3]; количество установленного высоковольтного оборудования; наличие слоя повышенного сопротивления на рабочих местах (подсыпка, кабельные каналы, бетонные плиты и т.д.).

Анализ публикаций. НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в течение 12 лет занимается проведением электромагнитной диагностики ЗУ с применением разработанного комплекса оборудования [4] и методики, которая нашла свое отражение в ГНД 34.20.303-2003 [5]. За это время было произведено обследование более 500 объектов классов напряжения 35 – 750 кВ и было выявлено, что ни одно ЗУ подстанций не соответствует в плане конструктивного исполнения требованиям нормативных документов, в частности Правилам устройства электроустановок [6, 7]. Так как информация после проведения диагностики ЗУ с течением времени устаревает, необходимо проводить ремонтно-восстановительные работы по ее результатам не позднее чем через 2 года. Поэтому, как уже отмечалось в [8], планировать средства для проведения диагностических и ремонтно-восстановительных работ следует одновременно.

Как следует из вышеизложенного, необходимо разработать методику, позволяющую прогнозировать затраты на проведение ремонтно-восстановительных работ.

Целью настоящей работы является построение прогнозной статистической модели по определению длины рекомендуемых ГЗ в зависимости от класса напряжения до проведения электромагнитной диагностики.

Материалы и результаты исследований. Расчеты производились с использованием базы данных, включающей подстанции, на которых в период с 2002 по 2007 гг. была проведена диагностика состояния ЗУ и разработаны рекомендации по его восстановлению. Объем базы данных составил 322 подстанции. Объектом анализа являлась общая длина ГЗ L , необходимых для восстановления ЗУ.

Расчеты проводились в следующем порядке:

1 Для некоторой совокупности подстанций, обладающих определенным признаком, определялись резко отклоняющиеся значения длины ГЗ – L^* , которые удалялись из совокупности.

2 Для оставшейся совокупности определялся закон распределения протяженности ГЗ, необходимых для проведения ремонтных работ.

Анализируемые совокупности и объем выборки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование группы объектов	Объем выборки (количество подстанций), шт.		Номер группы анализа
	до удаления резко выделяющегося значения	после удаления резко выделяющегося значения	
ОАО «Донецкоблэнерго» (35 кВ)	15	13	1
ОАО «Донецкоблэнерго» (110 кВ)	29	26	2
ОАО «Днепрооблэнерго» (35 кВ)	21	19	3
ОАО «Днепрооблэнерго» (110 – 150 кВ)	60	55	4
ОАО «Полтаваоблэнерго» (110 – 150 кВ)	17	15	5
ОАО «Крымэнерго» (110 кВ)	36	36	6
АК «Харьковоблэнерго» (110 кВ)	28	27	7
Подстанции 35 кВ, ОАО «Донецкоблэнерго», ОАО «Днепрооблэнерго», ООО «Сервис-Инвест», ОАО «Полтаваоблэнерго», ОАО «ЭК Севастопольэнерго», ЗАО «А.Е.С. Киевоблэнерго»	55	52	8
Подстанции 110 кВ, ОАО «Донецкоблэнерго», ОАО «Днепрооблэнерго», ОАО «Полтаваоблэнерго», ОАО «Крымэнерго», АК «Харьковоблэнерго»	112	108	9
Подстанции 150 кВ, ОАО «Днепрооблэнерго», ОАО «Полтаваоблэнерго».	58	52	10
Подстанции 330 кВ, Центральная ЭС НЭК Укрэнерго, Донбасская ЭС НЭК Укрэнерго, Северная ЭС НЭК Укрэнерго, Западная ЭС НЭК Укрэнерго, Днепровская ЭС НЭК Укрэнерго, Крымская ЭС НЭК Укрэнерго, Южная ЭС НЭК Укрэнерго	37	36	11

Резко отклоняющиеся значения определялись с использованием метода Греббса [9], согласно которому величина квантиля t вычисляемая по формуле:

$$t = \frac{|L_i^* - \bar{L}|}{S}, \quad (1)$$

где L_i^* – резко отклоняющееся значение (наибольшее или наименьшее); \bar{L} – среднее арифметическое значение; S – среднее квадратическое отклонение, сравнивается с его критическим значением.

Если полученное значение квантиля t больше критического $t_{кр}$, то резко выделяющееся значение из выборки удаляли.

После исключения резко выделяющегося значения из совокупности анализируемых данных, расчеты повторялись до получения значений квантиля меньше критического $t < t_{кр}$.

Далее по методике, изложенной в [9], для всех групп анализа, приведенных в табл. 1, строилась эмпирическая функция распределения.

Определение закона распределения L производилось следующим образом: была построена гистограмма и графически оценена близость распределения L к экспоненциальному [10].

Соответствие эмпирической функции распределения L экспоненциальному закону, который в данном случае описывался интегральной функцией:

$$F(L) = 1 - e^{-\lambda L}, \quad (2)$$

где λ – параметр экспоненциального распределения, оценивалось с помощью теста Колмогорова [10; 11]. Для этого по экспериментальным данным находили параметр экспоненциального распределения λ_{opt} из решения следующей задачи:

на множестве значений L требуется найти значение $\lambda \geq 0$, минимизирующее величину d , определяемую выражением:

$$d = \max |F_n(L) - F_0(L)|, \quad (3)$$

где $F_n(L)$ – эмпирическая функция распределения L ; $F_0(L) = 1 - \exp(-\lambda L)$ – функция экспоненциального распределения L .

Согласно теста величина максимального отклонения между эмпирической и теоретической функциями распределения, определяемая выражением (3) при известном λ , сравнивается с критической величиной $k_{n;a}$, зависящая от объема данных n и уровня значимости a .

Помимо определения λ_{opt} , были определены λ_{min} и λ_{max} , где λ_{min} , λ_{max} – соответственно минимальное и максимальное значение коэффициента λ , при котором вычисленная в формуле (3) величина d меньше или равна критическому значению $k_{n;a}$.

Таким образом все найденные λ отражают соответствие распределения L экспоненциальному закону. Как следует из (2) длина ГЗ обратно пропорционально зависит от параметра распределения λ , то есть $L \sim 1/\lambda$.

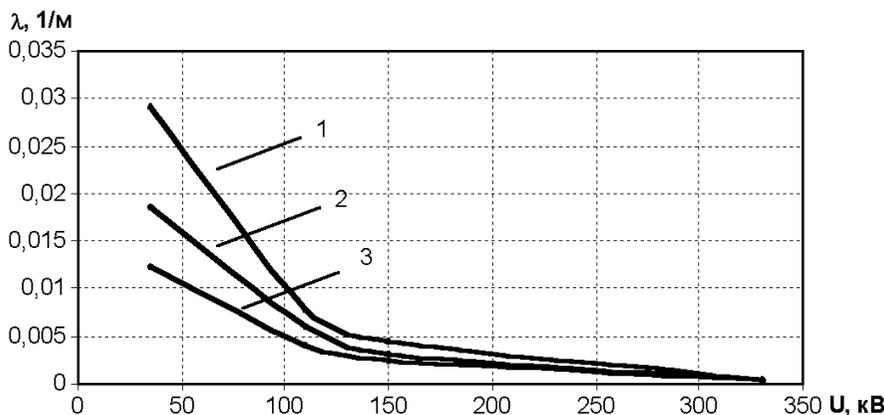
Таблица 2

Номер группы анализа	$\lambda, \text{ м}^{-1}$			Длина рекомендованных ГЗ с вероятностью 50 %, м при			Длина рекомендованных ГЗ с вероятностью 99 %, м при		
	λ_{min}	λ_{opt}	λ_{max}	λ_{min}	λ_{opt}	λ_{max}	λ_{min}	λ_{opt}	λ_{max}
1	0,012	0,017	0,024	84	59	42	384	271	192
2	0,0042	0,0054	0,0073	239	186	137	1097	853	631
3	0,013	0,022	0,039	77	46	26	355	210	119
4	0,0032	0,0034	0,0039	313	295	257	1440	1355	1181
5	0,014	0,026	0,083	72	39	13	329	178	56
6	0,0038	0,0061	0,011	264	164	91	1212	755	419
7	0,0027	0,0048	0,0067	371	209	150	1706	960	688
8	0,0124	0,0187	0,0292	81	54	35	372	247	158
9	0,00413	0,00595	0,00778	168	116	89	1115	773	592
10	0,002454	0,003225	0,004399	282	215	158	1877	1428	1047
11	0,000352	0,00041	0,0005	2841	2434	2124	13083	11205	9778

Поставленная задача решалась с использованием средств программного продукта Excel. Результаты расчетов сведены в табл. 2. В таблице для каждой группы анализа приведены значения параметра λ , длина рекомендованных ГЗ при вероятности 50 % (средняя длина рекомендованных ГЗ) и 99 % (длина ГЗ с вероятностью 99 %).

По данным групп анализа 8 – 11, приведенным в табл. 2, построены графики изменения коэффициента λ от класса напряжения подстанций (см. рисунок). Из рисунка видно, что с ростом класса напряжения параметр λ уменьшается и как следует из (2) при заданном уровне надежности, длина ГЗ, необходимых для ремонта, увеличивается. Из графиков видно, что при росте класса напряжения вариация λ от λ_{\min} до λ_{\max} уменьшается. Значительная вариация λ для подстанций 35 кВ и 110 кВ по-видимому свидетельствует о влиянии других факторов помимо класса напряжения.

Проверка достоверности вычислений по полученным моделям была произведена с использованием результатов диагностики подстанций за 2008 год, которые не входили в анализируемую совокупность, представленную в табл. 1.



Графики зависимости коэффициента λ от класса напряжения подстанций

1 – λ_{\max} ; 2 – λ_{opt} ; 3 – λ_{\min}

Проверка заключалась в сравнении для каждой подстанции реального значения длины ГЗ, необходимой для восстановления ЗУ, с расчетным значением приведенным в табл. 2 при 99 % вероятности и фиксировании факта превышения реальных значений над расчетными значениями. Далее определялся процент подстанций с таким превышением для каждого класса напряжений. Результаты проверки приведены в табл. 3. Как видно из таблицы, при использовании в прогнозной модели λ_{\min} все реальные значения не превышают прогнозируемые. При использовании λ_{opt} – превышение в пределах 5 % имеет место на подстанциях класса 35 кВ и 110

кВ. При использовании λ_{\max} – превышение составляет порядка 11 % для тех же классов подстанций.

Данные результаты позволяют сделать вывод, что статистическая модель удовлетворяет практическим требованиям и позволяет прогнозировать длину ГЗ, необходимых для ремонта, в зависимости от класса напряжения.

Таблица 3

Номер группы анализа	Кол-во подстанций	Расчетная длина ГЗ, м / превышение, %; при соответствующем λ		
		λ_{\min}	λ_{opt}	λ_{\max}
8 (35 кВ)	57	372/0	247/3,5	158/10,5
9 (110 кВ)	65	1115/0	773/4,6	592/10,8
10 (150 кВ)	11	1877/0	1428/0	1047/0
11 (330 кВ)	7	13083/0	11205/0	9778/0

Выводы

- 1 Выделены факторы, влияющие на длину рекомендованных горизонтальных заземлителей.
- 2 В работе предложена методика определения протяженности заземляющих ГЗ необходимых для ремонта ЗУ в зависимости от класса напряжения подстанции.
- 3 Показано, что статистическое распределение длин ГЗ, необходимых для ремонта, подчиняется экспоненциальному закону.
- 4 Разработанные статистические модели удовлетворяют практическим требованиям и позволяют прогнозировать длину ГЗ, необходимых для ремонта, в зависимости от класса напряжения.

Материалы статьи могут быть использованы для построения прогнозных моделей учитывающих другие характеристики подстанций.

В заключении авторы выражают благодарность сотрудникам отдела № 5, 6 НИПКИ «Молния» за предоставление данных для написания статьи.

Список литературы: 1. Кац Е.Л., Меньшов Б.Г., Целебровский Ю.В. Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. электр. станции и сети. – М.: ВИНТИ. – 1989. - Т. 15. – 158 с. 2. Борисов Р.К., Колушко Г.М., Гримуд Г.И., Васильковский А.П., Чевычелов В.А., Колушко Д.Г. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 4. – С. 29-32. 3. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений и токов. – Введ. 01.07.83. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 6 с. 4. Колушко Г.М., Доценко В.И., Колушко Д.Г., Недзельский О.С. Измерительный комплекс для проведения электромагнитной диагностики состояния заземляющих устройств электроэнергообъектов. // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков: НТУ «ХПИ». – Тем. вып. «Электроэнергетика и преобразовательная техника». – 2002. – С. 157-166. 5. Шкуринский Г.М., Заболотникова Л.П.,

Колушко Г.М. та ін. Випробування та контроль стану заземлювальних пристроїв електроустановок. Галузевий нормативний документ ГНД 34.20.303-2003. – Київ: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – 2004. – 52 с. **6.** Правила устрою електроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с. **7.** *Бороницький М.А., Карнець І.Я., Лях В.В. та ін.* Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи електробезпеки. – Київ: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2006. – 71 с. **8.** *Колушко Г.М., Колушко Д.Г., Федоров В.А., Гримуд Г.И., Васьковський А.П., Плакида В.Т., Березовський С.И.* К вопросу проведения электромагнитной диагностики и ремонта заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Электрические сети и системы. – 2006. – №3. – С. 36-40. **9.** *Колкер Я. Д.* математический анализ точности механической обработки деталей. – Киев: Техніка, 1976. – 200 с. **10.** *Хаушильд В., Мош В.* Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений / Пер. с нем. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 312 с. **11.** *Мюллер П., Нойман П., Шторм Р.* Таблицы по математической статистике / пер. с нем. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.

Поступила в редколлегию 31.03.2009.